

Abschlußbericht

zum Forschungsvorhaben

"Spannbetonrammpfähle - Auswirkung der Rammung auf die Rißbildung"

Sachbearbeiter : Dipl.-Ing. B. Kepp
Dipl.-Ing. A. Rohling
Forschungsbetreuer : Prof.Dr.-Ing. F.S. Rostásy

Braunschweig, Januar 1982

Gefördert mit Forschungsmitteln des Landes Niedersachsen
(Mittel des Zahlenlottos) - Bew.Nr. 2091 BV 4e - 11/80 -

Inhaltsangabe

1. Untersuchungsziel
2. Der vorgespannte Ramppfahl
3. Die Beanspruchung des Pfahls durch den Rammschlag
4. Umfang der Versuche
5. Meßtechnik
 - 5.1 Meßmethode zur Bestimmung der Betondehnungen
 - 5.2 Meßmethode zur Bestimmung der Übertragungslänge und deren Veränderung
6. Herstellung der Versuchspfähle
 - 6.1 Konstruktion und Fertigung der Pfähle
 - 6.2 Verwendete Baustoffe
7. Durchführung der Versuchsrammung
 - 7.1 Bodenmechanische Kennzeichnung der Rammbaustelle
 - 7.2 Rammgerät
 - 7.3 Rammprotokoll
8. Betonbeanspruchung während des Rammens
 - 8.1 Allgemeines
 - 8.2 Meßergebnisse
9. Veränderung der Übertragungslänge infolge Rammung
 - 9.1 Grundsätzliche Überlegungen
 - 9.2 Rechnerische Bestimmung der Übertragungslänge
 - 9.3 Durchführung der Spannstahldehnungsmessungen und Aufzeichnung der Meßergebnisse

- 10. Rißuntersuchungen
- 11. Der Dynamische Pfahltest
- 12. Begleitkörperuntersuchungen
 - 12.1 Litzenausziehversuche
 - 12.1.1 Prüfkörper und Versuchsdurchführung
 - 12.1.2 Meßergebnisse
 - 12.2 Litzenausziehversuche an gerammten Pfahlköpfen
 - 12.2.1 Ziel der Untersuchung, Versuchsmaterial und Versuchsaufbau
 - 12.2.2 Meßergebnisse
 - 12.3 Untersuchung des Pfahlbetons
 - 12.3.1 Allgemeines
 - 12.3.2 Druckfestigkeitsuntersuchung
 - 12.3.3 Spaltzugfestigkeitsuntersuchung
 - 12.3.4 Bestimmung des Elastizitätsmoduls
- 13. Abschließende Bemerkungen
- 14. Zusammenfassung
- 15. Literaturverzeichnis

Anlagen

1. Untersuchungsziel

Das Ziel der Untersuchung besteht darin, die Auswirkung der Rammbeanspruchung auf den inneren Spannungszustand von Spannbetonpfählen und auf deren Rißbildung festzustellen. Von besonderem Interesse sind dabei die Pfahlendbereiche, in denen bei Vorspannung mit sofortigem Verbund die Vorspannkräfte innerhalb einer bestimmten Länge eingeleitet werden. Um die angesprochenen Probleme zu klären, wurden Proberammungen durchgeführt. Der dabei untersuchte Pfahltyp wird im norddeutschen Raum häufig verwendet. Als Rammgerät wurde eine übliche Dieselramme eingesetzt.

Während der Proberammung wurden folgende Messungen bzw. Beobachtungen vorgenommen:

- Dehnungen des Pfahlbetons während des Rammschlags
- Veränderung der Spannkrafteinleitungslänge
- Schädigung des Verbundes zwischen Spannstahl und Beton
- Ausbildung von Längs- oder Querrissen

2. Der vorgespannte Rammpfahl

Spannbetonrammpfähle gelten als dauerhafte und wirtschaftliche Gründungselemente, die mit den verschiedensten Abmessungen und Querschnittsformen hergestellt werden. So finden beispielsweise quadratische Pfähle mit Kantenlängen von 30 oder 40 cm wie auch Pfähle mit dreieckigem oder rundem Querschnitt Verwendung. Die Pfahllänge hängt von den jeweiligen Gelände- und Bodenverhältnissen ab, wobei durch Zusammenkuppeln einzelner Elemente sehr große Gesamtlängen erzielt werden können. Beim Bau der Brücke über den Maracaibo-See in Venezuela wurden Pfähle von maximal 60 m Länge hergestellt, die einen

zylindrischen Hohlquerschnitt von 91,5 cm Außendurchmesser haben. Eine zusammenfassende Darstellung der heutigen Spannbetonpfahlssysteme ist in [1] und [2] enthalten.

In der Bundesrepublik Deutschland werden Rammpfähle generell in der DIN 4026 [3] geregelt. Diese Norm enthält die pauschale Forderung, daß der Pfahl alle Beanspruchungszustände ohne Rißbildung überstehen muß. Diese Forderung wird mit der bei Grundbauwerken unvermeidlichen Korrosionsgefährdung begründet. Es ist jedoch anzumerken, daß zur Zeit nur ein unvollständiger Kenntnisstand über die Beanspruchung während des Rammens vorhanden ist. Somit stellen auch die Mindestbewehrung bzw. die Mindestvorspannung noch ungelöste Probleme dar.

Wenn im Beiblatt zur DIN 4026 ausgeführt wird, daß Spannbetonpfähle im allgemeinen auch eine schlaaffe Längsbewehrung enthalten, so wird damit die Unsicherheit bezüglich einer sachgerechten Regelung dieses Pfahltyps deutlich. Im Abschnitt 5.2.2 heißt es weiter: "Es sind aber auch schon Spannbetonpfähle ohne schlaaffe Bewehrung im Mittelbereich ausgeführt worden." Soweit den Verfassern bekannt ist, werden in der Bundesrepublik Spannbetonpfähle jedoch ohne schlaaffe Bewehrung in Längsrichtung hergestellt. Eine diesbezügliche Literaturdurchsicht ergab, daß dieses Konstruktionsprinzip auch für andere Länder Gültigkeit hat.

3. Beanspruchung des Pfahls durch den Rammschlag

Durch den Rammvorgang wird der Pfahl auf die erforderliche Tiefe geschlagen, wobei der sich unterhalb der Pfahlspitze befindliche Boden verdrängt und zugleich die sich einstellende Mantelreibung überwunden wird. Die dabei entstehende Beanspruchung des Pfahls hängt von zahl-

reichen Parametern ab, die an dieser Stelle nur stichwortartig angesprochen werden können:

- Rammgerät, Haubenfutter, Verhältnis Bärgewicht : Pfahlgewicht, Fallhöhe
- Bodenverhältnisse (Spitzenwiderstand, Mantelreibung)
- Pfahllänge

Eine eingehende Darstellung dieser Problematik mit umfangreicher Literaturangabe befindet sich in [4].

Von besonderer Bedeutung für die durchzuführende Untersuchung ist, daß die Betondruckbeanspruchung bei unsachgemäßer Rammung einen nahezu beliebig hohen Wert erreichen kann. Dies kann beispielsweise durch einen schweren Rammbaren und zu große Fallhöhe verursacht werden. Die dadurch ausgelöste Druckwelle durchläuft den Pfahl und wird an seiner Spitze reflektiert. Sofern ein großer Spitzenwiderstand vorhanden ist, wird die Druckwelle auch als Druckwelle reflektiert. Ist hingegen der Spitzenwiderstand gering, so ist die rücklaufende Welle eine Zugwelle. Die dadurch verursachten Zugspannungen können bei Betonpfählen eine erhebliche Querrißbildung bewirken und im Extremfall sogar zum Abreißen der Pfahlspitze führen.

Bei der Rammung ist darüber hinaus sicherzustellen, daß Außermittigkeiten möglichst vermieden werden.

Während des Rammschlags wird ein Teil der Pfahlkopfoberfläche stoßartig belastet. Innerhalb eines gewissen Störbereichs erfolgt eine gleichmäßige Verteilung der Druckspannungen über den Gesamtquerschnitt. In diesem Bereich bilden sich infolge Kraftausbreitung Querdehnungen und damit auch Querzugspannungen aus, die von Dijst [5] an einem Pfahlkopf gemessen wurden, der allerdings aus einem Kunstharzbeton ohne Querbewehrung bestand. Die rammbedingten Querzug-

spannungen überlagern sich mit den Spaltzugspannungen bei Verbundverankerungen, was zu Längsrissen im Pfahlkopf führen kann. Im Rahmen dieser Untersuchung soll neben Betondehnungsmessungen und Rißbeobachtungen der Einfluß der Rammung auf die Größe des Spannkrafteinleitungsbereichs erfaßt werden.

4. Umfang der Versuche

Der Versuchsumfang ist in Tabelle 1 zusammengestellt; er umfaßt Baustellen- und Laborversuche.

Baustellenversuche

Die Proberammung erfolgte an insgesamt 3 Pfählen, \varnothing 33 cm, von jeweils 15 m Länge. Nach dem Rammplan, der als Anlage 6 beigelegt ist, waren die Pfähle mit Nr. 20, 23 und 24 bezeichnet. Pfahl Nr. 24 ist ein Kupplungspfahl, dessen Unterpfahllänge $L = 7,0$ m beträgt. Die beiden anderen Pfähle sind ungekuppelt gewesen.

Die Rammung wurde am 05.05.1981 auf einer Baustelle in Bremerhaven durchgeführt. Als Rammgerät kam ein Dieselbär Typ Delmag D 30 zum Einsatz. Nähere Angaben hierzu enthält der Abschnitt 7.

Bei der Rammung wurden während einzelner Schläge die Betondehnungen gemessen, wozu auf den Pfahl Dehnmeßstreifen aufgeklebt waren. Vor Beginn der Rammung und nach jeweils etwa 200 Schlägen wurde im Pfahlkopfbereich die Veränderung der Spannstahldehnung gemessen. Weiterhin wurde in Abhängigkeit von den Schlagzahlen die Pfahleindringung festgestellt und der Pfahl in seinem freien Bereich visuell auf Rißbildung untersucht. Eine weitere Rißkontrolle wurde durch die "Dynamische Pfahltestmethode DPT" vom Lehrstuhl für Grundbau und Bodenmechanik der TU Braunschweig durchgeführt. Die Methode stellt eine Integritätsprüfung dar und ermöglicht u.a. die Lokalisierung von klaffenden Rissen. Auf diese Meßmethode wird im Abschnitt 11 eingegangen.

Laborversuche

Im Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der TU Braunschweig wurden Druckfestigkeit, Spaltzugfestigkeit des Pfahlbetons, sein statischer E-Modul sowie der Elastizitätsmodul bei hoher Belastungsgeschwindigkeit bestimmt.

Weiterhin wurden Litzenausziehversuche an 2 Pfahlköpfen vorgenommen, die von geramnten Pfählen stammten. Die Pfähle waren unter den gleichen Bedingungen hergestellt und gerammt worden wie die eigentlichen Versuchspfähle. Mit diesen Versuchen sollte der Rammeinfluß auf den Verbund in dem hinsichtlich der Spannstahlverankerung besonders interessierenden Pfahlkopfbereich ermittelt werden.

Bereits zu einem früheren Zeitpunkt war die Verbundfestigkeit zwischen Spannstahl und Pfahlbeton ermittelt worden. Die dabei verwendeten Verbundproben wurden mit den gleichen Baustoffen hergestellt. Sie entsprachen von ihren Abmessungen her den gültigen IfBt-Richtlinien.

Tabelle 1: Zusammenstellung der durchgeführten Versuche

<u>A - Baustellenversuche</u>	<u>Pfahl Nr.</u>	<u>20</u>	<u>23</u>	<u>24</u>
Messungen der Betondehnungen während des Rammschlags	am Pfahlkopf im Pfahlmittenbereich	x	x	x x
Messungen der Spannstahldehnungen zur Ermittlung der Veränderung der Eintragungslänge		x	x	x
visuelle Rißkontrolle		x	x	x
Integritätsprüfung mit der DPT-Methode		x	x	x
<u>B - Laborversuche</u>				
Ausziehversuche von Litzen aus gerammten Pfahlköpfen		6 Versuche an 2 Pfahlköpfen		
Begleitkörperuntersuchungen				
Druckfestigkeitsuntersuchungen		3 Würfel		
Spaltzugfestigkeitsuntersuchungen		2 Zylinder		
Ermittlung des statischen E-Moduls		2 Zylinder		
Ermittlung des dynamischen E-Moduls		1 Zylinder		
Ausziehversuche an einbetonierten Spannstahllitzen		10 Ausziehkörper		

1
9
1

5. Meßtechnik

5.1 Meßmethode zur Bestimmung der Betondehnungen

Zur Bestimmung der durch den Rammschlag verursachten Betondehnungen wurden jeweils 1 m unterhalb des Pfahlkopfes 3 Dehnmeßstreifen (DMS) in Pfahllängsrichtung auf den Beton geklebt. Die Meßstellen bildeten untereinander einen Winkel von 120° (Drittelspunkte des Pfahlumfangs). Ihre Lage und die Bezeichnung gehen aus Tabelle 2 und aus Bild 8 hervor. Bei dem gekuppelten Pfahl Nr. 24 waren 3 weitere Betonmeßstellen angeordnet, und zwar 6,50 m unterhalb des Pfahlkopfes bzw. 1,50 m oberhalb der Kupplung. Diese DMS waren zum Schutz vor mechanischer Beschädigung in einer Betonaussparung von 25 mm Tiefe angeordnet und durch eine aufgeschraubte Blechplatte abgedeckt. Ihr Anschlußkabel wurde erst im Pfahlkopfbereich aus dem Pfahlbeton herausgeführt.

Tabelle 2: Bezeichnung der Betonmeßstellen

Meßstellen- bezeichnung	Lage (vergl. Anlage 1)	Pfahl Nr.	DMS-Typ ¹⁾
BO1, BO2, BO3	Pfahlkopfbereich	20, 23, 24	60/120 LP21
BU1, BU2, BU3	Pfahlmittenbereich	24	DB1

¹⁾ Fabrikat: Hottinger - Baldwin - Meßtechnik

Die Betondehnungen wurden über einen Lichtstrahloszillographen aufgezeichnet. Eine Darstellung der Meßkette befindet sich in Bild 1.

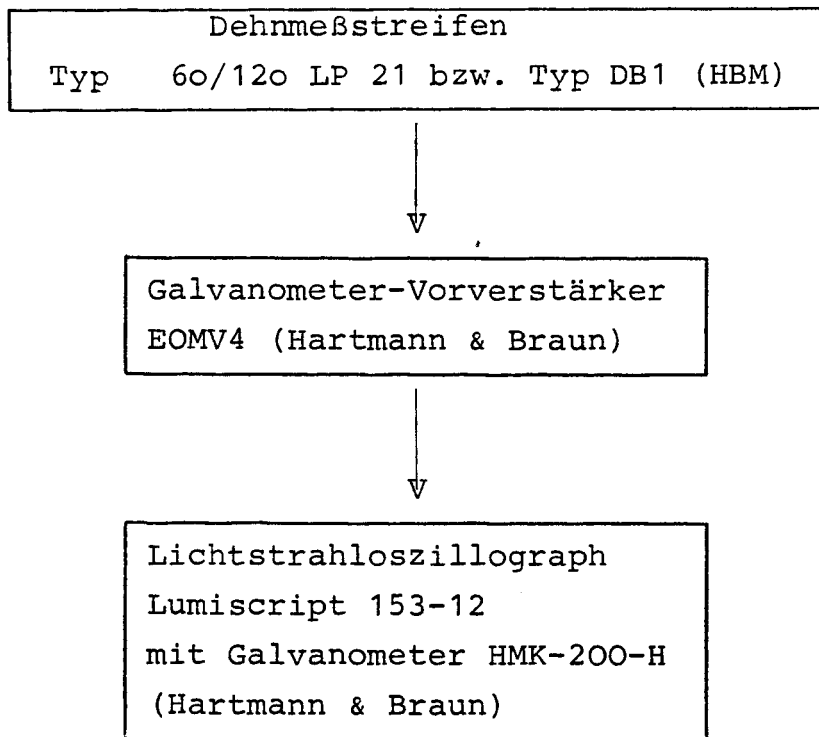


Bild 1: Meßkette zur Bestimmung der Betondehnungen während des Rammschlags

5.2 Meßmethode zur Bestimmung der Übertragungslängen und deren Veränderung

Die Bestimmung der Übertragungslänge bei Vorspannung mit sofortigem Verbund wird im allgemeinen nach der vom IfBt herausgegebenen Richtlinie [6] durchgeführt. Danach werden die Betonlängsdehnungen in einem zentrisch vorgespannten stabförmigen Element vor und nach Übertragung der Vorspannkraft mit einem Setzdehnmessermesser ermittelt. Zu diesem Zweck werden auf der Betonoberfläche Meßreihen geschaffen, die aus aufgeklebten Meßmarken bestehen; alles weitere siehe [6]. Hier wurde der Spannbetonpfahl selbst als Versuchskörper zur Bestimmung der Übertragungslänge gewählt. Die Übertragungslänge wird aus dem Verlauf der Stahllängsdehnungen ab Stirnende des Pfahls unmittelbar nach Übertragen der Vorspannung auf den Beton bestimmt. Darüber hinaus interessierte aber v.a. die Veränderung der Übertragungslänge infolge Rammens, da zu vermuten ist, daß damit eine Lockerung des Verbundes verbunden sein wird.

Das Meßverfahren nach [6] war bei den Untersuchungen an Spannbetonpfählen nicht anwendbar, da die Gefahr des Abplatzens der Marken während des Transports der Pfähle bzw. während des Rammens bestand. Nachteilig wäre auch die vergleichsweise niedrige Vorspannung der Pfähle gewesen, was zu großen Ungenauigkeiten infolge kleiner Dehnungsdifferenzen geführt hätte.

Daher wurde ein Verfahren gewählt, bei dem die Spannstahldehnungen bzw. ihre Veränderung im Eintragungsbereich durch auf den Spannstahl aufgeklebte DMS festgestellt werden. Eine Verbundlockerung infolge Rammens hat einen Litzenschlupf zur Folge, der als Dehnungsänderung (Verminderung der Spannstahldehnung) meßbar wird.

Eine schematische Darstellung des Verlaufs der Verbundspannungen τ_v und der Stahlspannungen σ_s enthält Bild 2. Aus ihr geht hervor, daß die Verbundspannung ohne äußere Einwirkung zu Beginn des Übertragungsbereichs einen Spitzenwert erreicht, was zu einer raschen Spannungszunahme im Spannstahl führt. Eine Verbundlockerung infolge Rammens bewirkt einen Abbau der Spitzenspannungen infolge Schlupf und eine Vergrößerung der Übertragungslänge.

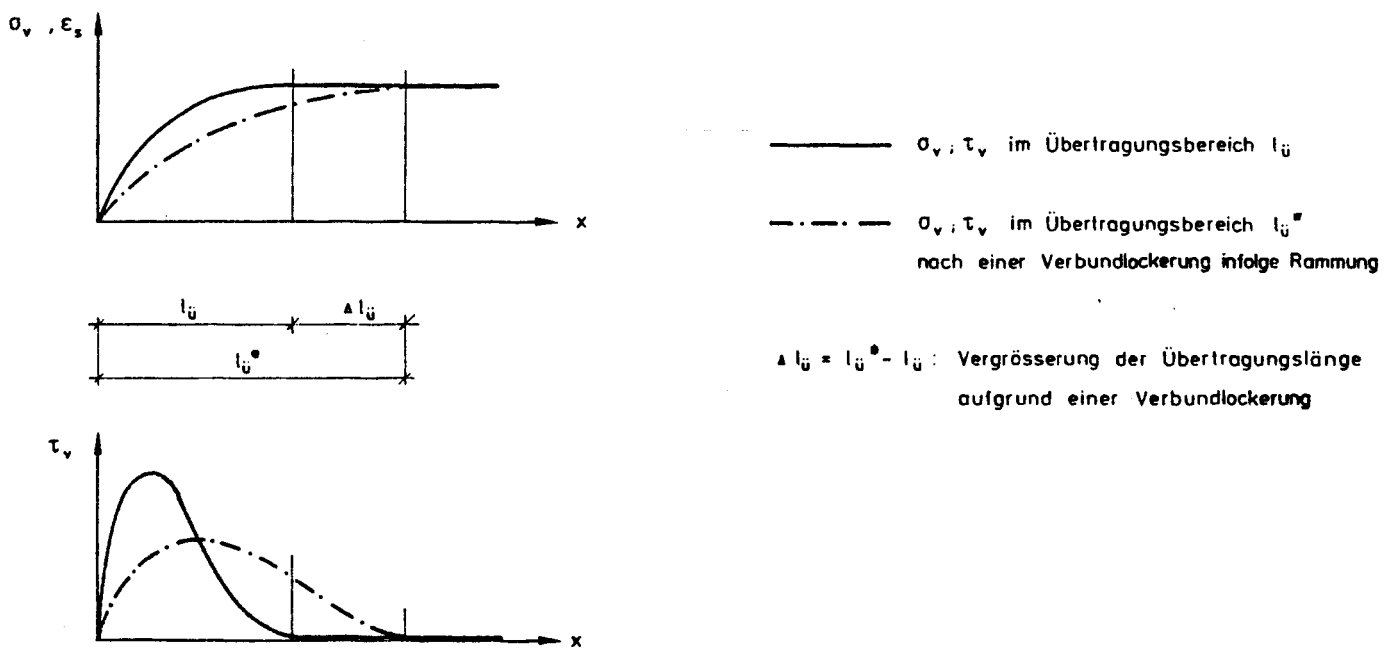


Bild 2: Schematische Darstellung der Spannungsverläufe innerhalb der Übertragungslänge

Um die Verbundlockerungen bestimmen zu können, wurden im Übertragungsbereich Dehnmeßstreifen im Abstand von 30 cm auf die Litzen geklebt. Die Lage und Numerierung der Meßstellen geht aus Bild 10 (Anlage 3) hervor. Diese Anlage enthält auch die

Abbildung einer Meßstelle, die aus einem DMS Typ 3/120 LY51 besteht (Meßgitterlänge 3 mm, -breite 0,3 mm). Der DMS wird auf einen Außendraht der 7-drähtigen Litze geklebt und anschließend mit einem silikonartigen Abdeckungsmittel zum Schutz vor Feuchtigkeit bestrichen. Jede Meßstelle stellt eine gewisse Verbundstörung von ca. 35 mm Länge dar. In jedem Pfahl wurden 2 der insgesamt 6 Litzen zur Dehnungsmessung herangezogen. Die Meßlitzen wurden in der MPA Braunschweig mit DMS bestückt und geeicht. In Vorversuchen war die grundsätzliche Eignung dieses Meßverfahrens für die Anwendung bei Ramppfählen untersucht worden. Diese Versuche hatten auch gezeigt, daß die Meßstreifen insbesondere durch den Betoniervorgang in einem Fertigteilwerk keine mechanische Überbeanspruchung erfahren.

6. Herstellung der Versuchspfähle

6.1 Konstruktion und Fertigung der Pfähle

Die Pfähle wurden als spannbettgefertigte Fertigteilelemente mit Kreisquerschnitt \varnothing 33 cm im Betonwerk der Firma BINAB GmbH hergestellt. Sie werden durch 6 Litzen vorgespannt, die eine Betondruckspannung zum Zeitpunkt des Vorspannens von $\sigma_{b,v} = 3,6 \text{ N/mm}^2$ erzeugen. Die Litzen werden über Verbund verankert.

In Querrichtung erhalten die Pfähle eine Spiralbewehrung aus glattem Stahl BSt IV G. Die Bewehrungsführung ist in Bild 11 dargestellt. Als Schalung wird eine beheizbare Stahlschalung verwendet. Der Beton B 45 wird durch Innenrüttler verdichtet. Die Übertragung der Vorspannkraft auf den Beton erfolgt durch Entspannpresen bei einer Betondruckfestigkeit von $\beta_w \geq 31,4 \text{ N/mm}^2$. Die gekuppelten Pfähle werden mit einer stählernen Kupplung vom Typ BINAB-Herkules ausgerüstet.

6.2 Verwendete Baustoffe

Beton B 45

Zementart : PZ 450 F - HS - NA

Zuschlag : Grubensand und Granitsplitt (Größtkorn 25 mm)

Zusatzmittel: Betonverflüssiger

Bewehrung

Längsbewehrung : 6 x 3/8" Litzen St 1570/1770

Spiralbewehrung: Ø 5 BSt 500/550 GU

7. Durchführung der Versuchsrammung

7.1 Bodenmechanische Kennzeichnung der Rammbaustelle

Die Rammung der Pfähle erfolgte am 05.05.1981 in unmittelbarer Nähe des Fischereihafens von Bremerhaven. Zur Untersuchung des Baugrundes wurden im Bereich der Pfähle 2 Drucksondierungen (DS) und 1 Rammkernsondierung (RKS) durchgeführt. Die Sondierungspunkte sind im Pfahlplan eingetragen (Bild 12).

Die Schichtenprofile sind in Bild 13, die Spitzendruck-Diagramme in den Bildern 14-17 dargestellt. Danach stehen bis zu einer Tiefe von 6,40 m Klei und Schluff an. Darunter lagern mit Klei- und Schluffstreifen durchsetzte Fein- und Mittelsande. Unterhalb einer Tiefe von 10,20 m wurden Fein- und Mittelsande angetroffen, die eine mitteldichte bis sehr dichte Lagerung aufweisen.

7.2 Rammgerät

Die Pfähle wurden mit einem Dieselbären Typ "Delmag D 30" gerammt. Das Schlaggewicht des Kolbens beträgt 3,0 t, die Rammenergie wird mit 75,0 kNm angegeben. Als Trägergerät wurde eine

Akermann-M14-Ramme mit hydraulischer Mäklerversstelleinrichtung verwendet. Zum Schutz des Pfahlkopfes wurden gut sitzende Rammhauben mit einer oberen Hartholzlage und einem Haubenfutter aus Weichholz eingesetzt.

7.3 Rammprotokoll

In den Rammprotokollen wurden die Schlagzahlen je 50 cm Pfahleindringung notiert (siehe Bilder 18 bis 20). Die Pfähle wurden bis an eine Tiefe von 14,20 m unter Geländeoberkante gerammt.

8. Betonbeanspruchung während des Rammens

8.1 Allgemeines

Die Beanspruchung des Pfahlbetons durch den Rammschlag wird durch zahlreiche Faktoren beeinflusst. Dazu zählen das Verhältnis Bärgewicht/Pfahlgewicht, Fallhöhe des Bären, Art und Zustand des Haubenfutters, Bodenverhältnisse, Pfahllänge u.a.m.. Der innere Widerstand des Pfahls gegenüber der Rammung, d.h. die Fähigkeit, die Rammbeanspruchung unbeschadet zu überstehen, wird von Konstruktionen und betontechnologischen Maßnahmen beeinflusst. Auf diesen Punkt wird im Abschnitt 13 kurz eingegangen.

Bei den Versuchspfählen wurden die Betondehnungen in der unter 5.1 beschriebenen Art gemessen und über die Zeit durch Oszillogramme aufgezeichnet. Dabei sind verschiedene Zeitphasen während eines Rammschlages zu unterscheiden:

- Phase I Kompressionszeit ca. 50 msec
 - Kompression des Betriebsstoff-Luft-Gemisches

Phase II Stoßzeit ≤ 10 msec

- Zündung des Betriebsstoff-Luft-Gemisches, maximale Pfahlbeanspruchung durch Explosionsdruck und Stoß

Phase III Verbrennungs- und Expansionszeit ca. 60 msec

- Die Verbrennungszeit fällt mit der Stoßzeit zusammen, an die sich die Expansion anschließt.

Der Rammschlag löst eine Druckwelle aus, die den Pfahl durchläuft und an seiner Spitze reflektiert wird. Sofern ein wesentlicher Spitzenwiderstand vorhanden ist, wird die Welle als Druckwelle reflektiert. Ist der Spitzenwiderstand jedoch gering, so wird die Druckwelle in eine Zugwelle umgewandelt, die die Zugfestigkeit des Betons einschließlich der aufgebrachten Vorspannung überschreiten kann und im Extremfall zu einem Abreißen der Pfahlspitze führt.

8.2 Meßergebnisse

Die in Pfahllängsrichtung gemessenen Betondehnungen ϵ_b sind in den Tabellen 3 und 4 bzw. den Bildern 21 und 22 numerisch und graphisch zusammengestellt. Die Messungen ergaben ausnahmslos Druckdehnungen.

In Bild 3 ist beispielhaft ein Oszillogramm für den 200. und den 550. Schlag (Pfahl Nr. 23, Meßstelle Bo3) dargestellt. Dabei wurde in der Stoßphase ein Maximalwert von $\epsilon_b = - 1,4$ ‰ gemessen. Eine zweite Spannungsspitze, die einen Wert von $\epsilon_b \sim - 0,9$ ‰ erreicht, fällt in die Expansionsphase. Sie ist auf die rücklaufende Druckwelle und das Nachschlagen des Bären zurückzuführen. In Bild 21 sind die Meßergebnisse der Größtwerte als Mittelwerte von jeweils 3 Einzelmessungen aufgetragen. Die Pfähle

Nr. 20 und 24 wiesen bis zum 500. Rammschlag zunehmende Dehnungen auf, was auf den größer werdenden Spitzenwiderstand zurückzuführen ist. Während das Dehnungsniveau bei Pfahl 20 annähernd konstant bleibt, fallen die Werte bei Pfahl 24 ab. Möglicherweise ist diese Erscheinung durch einen Leistungsrückgang des Dieselbären zu erklären. Wesentlich höhere Dehnungswerte wurden bei Pfahl 23 gemessen, die bei etwa 500 Schlägen auf $\epsilon_{b,m} = -1,22\%$ ansteigen. Durch die erhöhte Rammenergie pro Schlag erreichte der Pfahl mit einer kleineren Schlagzahl die erforderliche Tiefe.

In Bild 22 ist das Ergebnis der an jedem einzelnen DMS gemessenen Dehnungswerte für den Pfahl 24 aufgetragen. Die Dehnungsunterschiede beruhen entweder auf exzentrischer Rammung oder auf einer Winkelabweichung zwischen der Wirkungslinie des Bären und der Pfahlachse. Ähnliche Ergebnisse wurden für die beiden anderen Pfähle festgestellt.

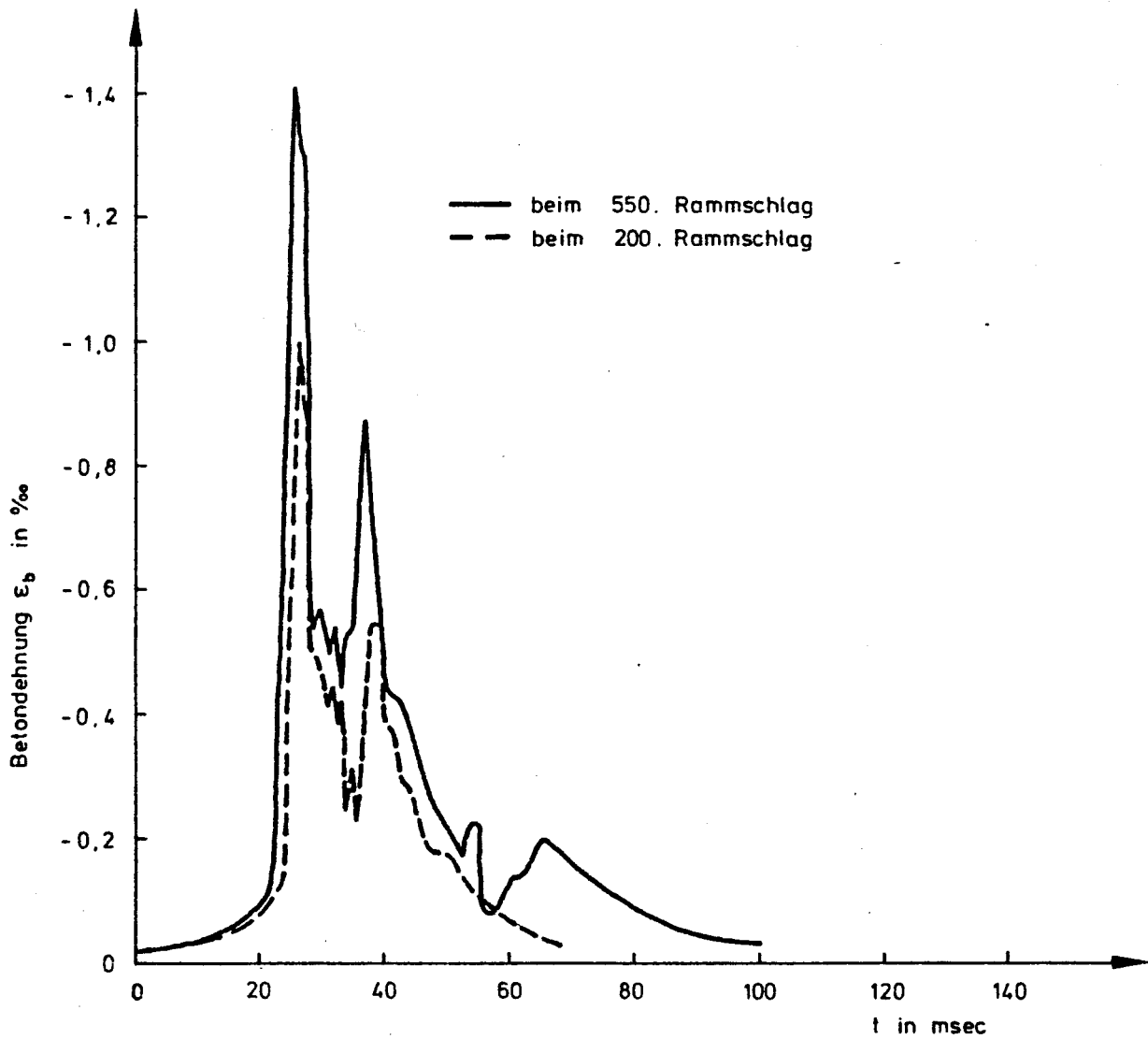


Bild 3: Betondehnungen während des Rammschlags
(Pfahl Nr. 23, Meßstelle Bo3)

9. Veränderung der Übertragungslänge infolge Rammung

9.1 Grundsätzliche Überlegungen zur Auswirkung der Rammung auf die Übertragungslänge

Die Rammung verursacht eine wiederholte Teilflächenbelastung des Pfahlkopfes. Durch konstruktive Maßnahmen wird zwar sichergestellt, daß die Litze nicht unmittelbar durch den Rammschlag beansprucht wird. Über Verbund wird jedoch eine Druckwelle in die Litze eingeleitet, wo lediglich geringfügige Stahlspannungen vorhanden sind (vgl. Bild 5). Im Pfahlendbereich breitet sich die Druckspannung innerhalb einer bestimmten Störungslänge gleichmäßig über den Pfahlquerschnitt aus, was mit quergerichteten Spaltzugkräften verbunden ist. Spaltzug- und Stirnzugkräfte werden auch durch die Einleitung der Vorspannung erzeugt [7]. Somit entsteht eine Überlagerung von verschiedenen dauernd und nur kurzzeitig wirkenden Zugspannungskomponenten.

Die Verankerung von Spannstahllitzen durch sofortigen Verbund läßt sich mechanisch in zwei Kraftwirkungen untergliedern:

- a) Haftverbund zwischen Stahl und Beton bei geringen Relativverschiebungen
- b) Reibungsverbund bei größeren Relativverschiebungen

Das folgende Bild 4 zeigt das Grundgesetz des Verbundes von einbetonierten Litzen mit kurzer Verbundlänge ($l_v = 4 d_s$). Diese Darstellung verdeutlicht die beiden Verbundwirkungen. Da der Reibungsanteil an der Verbundkraft eine entsprechende Radialpressung im Grenzbereich zwischen Litze und Beton voraussetzt, wird durch rambbedingte Zugspannungen in diesem Bereich eine kurzfristige Verminderung des Verbundes möglich. Eine entscheidende Bedeutung kommt hier der Spiralbewehrung zu.

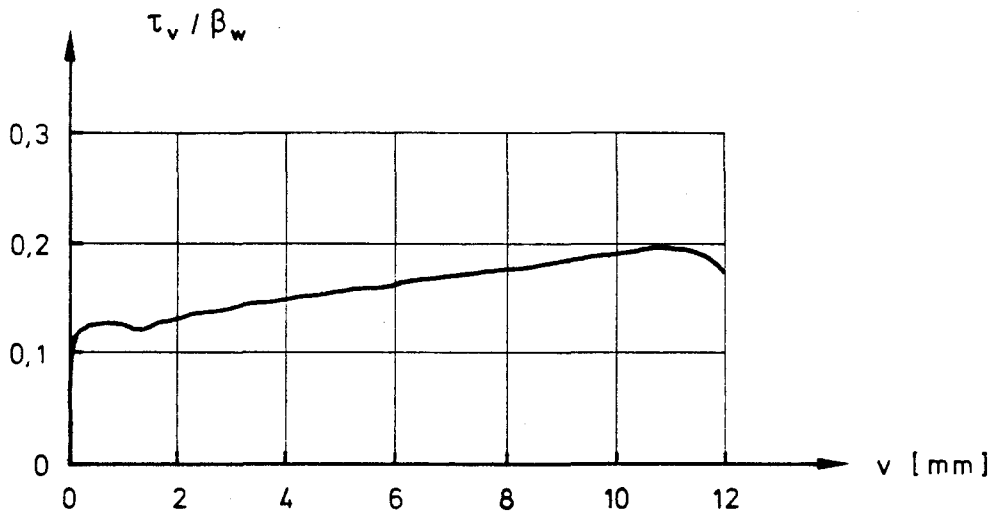


Bild 4: Schematische Darstellung des Schlupfverhaltens einbetonierter Litzen

9.2 Rechnerische Bestimmung der Übertragungslänge - ohne Rammeeinfluß -

Die Übertragungslänge $l_{\ddot{u}}$ wird nach DIN 4227 Gl. 17 nach folgender Formel bestimmt:

$$l_{\ddot{u}} = k_1 \cdot d_v$$

Für die bei den Untersuchungspfählen verwendeten Baustoffe ist für den Verbundfaktor k_1 für eine Betonfestigkeit $\beta_w \approx 32 \text{ N/mm}^2$ zum Zeitpunkt der Spannkraftübertragung und bei Verwendung von Spannstahllitzen nach Zulassung der Litze $k_1 = 75$ anzusetzen.

Der Vergleichsdurchmesser d_v beträgt für eine 3/8"-Litze mit

$$A_s = 52 \text{ mm}^2$$

$$d_v = \frac{A_s \cdot 4}{\pi}; \quad d_v = 8,14 \text{ mm}$$

Somit ergibt sich: $l_{\ddot{u}} = 75 \cdot 8,14 = 610 \text{ mm}$.

Wie in [8] dargestellt, können die versuchsmäßig ermittelten Übertragungslängen von den rechnerischen erheblich abweichen. Dies gilt insbesondere für Spannstähle mit niedriger bezogener Rippenfläche, was auf die Litzen zutrifft.

9.3 Durchführung der Spannstahldehnungsmessungen und Aufzeichnung der Meßergebnisse

Die Spannstahldehnungen wurden nach dem Vorspannen der Litzen im Spannbett unmittelbar vor Beginn der Rammung und in Rammepausen nach jeweils 200 Schlägen gemessen. Die Ergebnisse sind in den Tabellen 5 bis 7 bzw. den Bildern 23 bis 28 dargestellt.

Bei der graphischen Darstellung wurde auf der Ordinate der Verhältniswert F_w/F_0 aufgetragen. Dabei bedeutet

F_w - wirksame Vorspannkraft nach 56 Tagen
bzw. nach einer bestimmten Schlagzahl

F_0 - Vorspannkraft vor dem Übertragen der Vorspannung

Auf der Abszisse (unterer Bildrand) wurde der Meßstellenabstand vom Pfahlkopf aufgetragen, am oberen Bildrand ist die Meßstellennummer aufgeführt. Bei dieser Darstellung wurde die Verbundunterbrechung von 35 mm, die durch jede Meßstelle verursacht wurde, rechnerisch berücksichtigt. Die Ergebnisse sind als Kreuze markiert; die Verbindungslinien sind zur Verbesserung der Lesbarkeit eingezeichnet.

Aus den Kurvenverläufen geht hervor, daß die Vorspannung vor der Rammung innerhalb von etwa 60 cm eingetragen wird. Die Meßstellen, die innerhalb dieses Bereichs liegen, weisen als Folge der Rammung deutliche Dehnungsverminderungen und somit Vorspannkraftverluste auf. Eine Ausnahme bildet lediglich die Meßstelle Nr. 26. Beträgt der Abstand einer Meßstelle mehr als 80 cm vom Kopf, so sind (mit Ausnahme von Meßstelle Nr. 23) nur geringfügige Beeinflussungen der Stahldehnung feststellbar. Diese letztgenannten Dehnungsverluste sind hauptsächlich auf bleibende Betondehnungen durch die Rammbeanspruchung zurückzuführen.

In Bild 5 ist die Einleitung der Vorspannung aufgrund der durchgeführten Messungen schematisch dargestellt. Danach wird die Übertragungslänge von $l_{ü} \sim 60$ cm auf $l_{ü} \sim 80$ cm vergrößert. Die Spannungszunahme zeigt bei einem ungerammten Pfahl zunächst einen steilen Anstieg, der dann abflacht. Bei einem gerammten Pfahl ist die Spannungszunahme zunächst geringer; sie steigt nach einer

Störungslänge jedoch rasch an. Wie aus den Ausziehversuchen an gerammten Pfahlköpfen, über die im Abschnitt 12.2 berichtet wird, ersichtlich ist, bewirkt die Rammung kein völliges Verbundversagen. Es kann jedoch eine Beeinträchtigung des Verbundes entstehen.

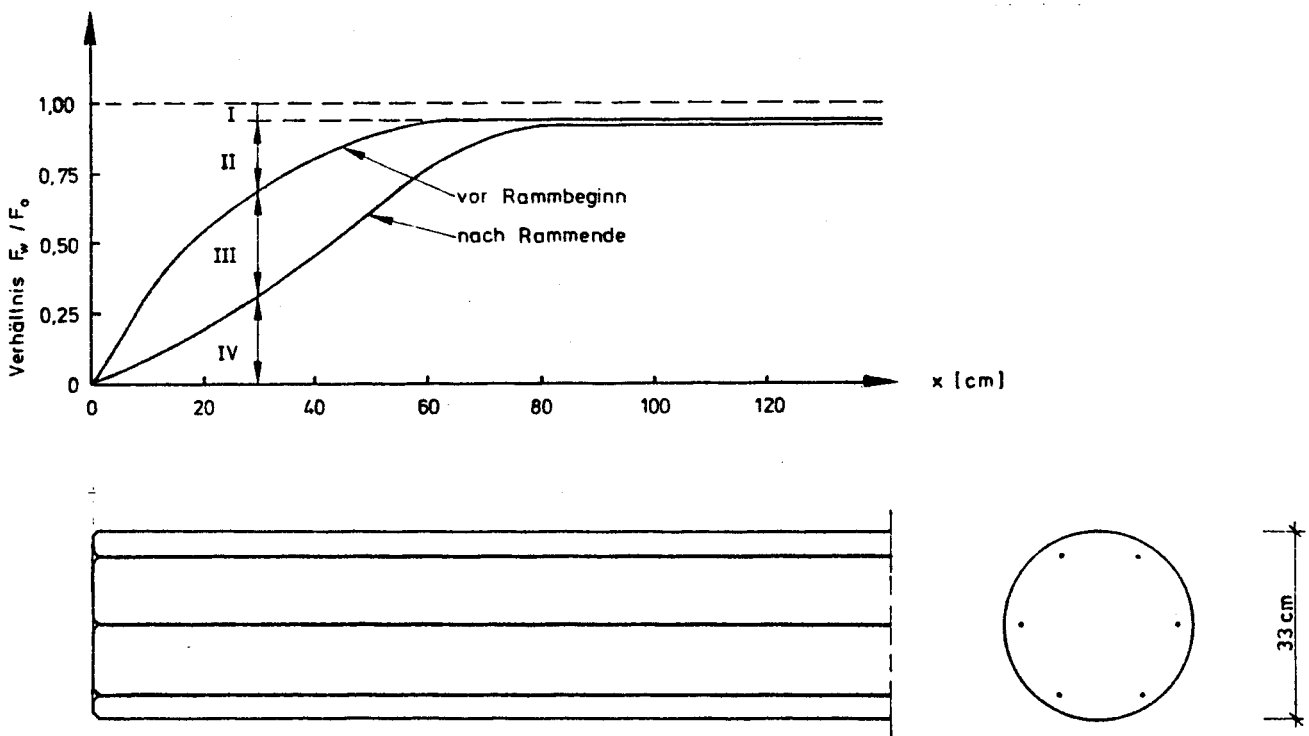


Bild 5: Einleitung der Vorspannkraft in den Rammpfahl

Bereich I : Spannungsverluste durch elastische Verformung des Betons, durch Kriechen und Schwinden

Bereich II : Schlupf des Spannstahls, Verbundkriechen

Bereich III: Einfluß der Rammung auf das Verbundverhalten; bleibende Verformung des Betons durch die Rammbeanspruchung

Bereich IV : wirksame Vorspannkraft nach Abschluß der Rammung

10. Rißuntersuchung

Bei Spannbetonpfählen sind als Folge der Rammung zwei Arten von Rissen zu unterscheiden :

- Querrisse bilden sich quer zur Pfahllängsrichtung aus, sobald die Zugfestigkeit des Betons zusammen mit der aufgetragenen Vorspannung überschritten wird.
- Längsrisse bilden sich überwiegend in den Pfahlendbereichen aus, wenn die Spaltzugfestigkeit durch die Beanspruchung aus Verankerungskraft und Rammschlägen überschritten wird.

Die Pfähle wurden vor der Rammung zunächst auf bereits vorhandene Risse abgesucht. Abgesehen von feinen Schwindrissen wurden keine weiteren festgestellt. Nach Aufnahme der Rammarbeiten wurde der jeweils freistehende Pfahlabschnitt in regelmäßigen Abständen visuell auf Rißbildung untersucht. Da die Pfähle eine Überlänge von $L = 1,00$ m hatten, konnte zumindest der Pfahlkopfbereich immer einwandfrei kontrolliert werden. Der Pfahlbeton wies weder in Quer- noch in Längsrichtung augenscheinlich erkennbare Risse auf.

Diese Beobachtung wurde über den "Dynamischen Pfahltest", über den im folgenden Abschnitt berichtet wird, bestätigt. Diese Testmethode ermöglicht generell die Lokalisierung zumindest klaffender Risse auch im unteren Pfahlbereich. Eine derartige Rißbildung konnte jedoch nicht festgestellt werden.

11. Der Dynamische Pfahltest

Zur Ermittlung der Pfahlbeanspruchungen während des Rammens wurden parallel zu den Messungen mit Beton-DMS als "Dynamische Pfahltests" bezeichnete Untersuchungen durchgeführt. Diese Messung wurde von Mitarbeitern des Lehrstuhls für Grundbau und Bodenmechanik der TU Braunschweig durchgeführt.

Die Meßmethode ist in dem "Abschlußbericht über dynamische Pfahltests (DPT) an BINAB-Spannbetonstählen" eingehend beschrieben. Sie besteht grundsätzlich aus einem elektronischen Messen und Aufzeichnen der Pfahldehnungen während des Rammschlages und der damit einhergehenden Pfahlbeschleunigungen. Aus den Dehnungen werden Pfahlkräfte ermittelt; die Beschleunigungswerte sind Ausgangsgrößen zur Bestimmung von Geschwindigkeitskurven.

Grundsätzlich können folgende Informationen durch die Durchführung von dynamischen Pfahltests gewonnen werden :

- Dynamischer Rammwiderstand
- Einfluß der Eigenschaften von Pfahl, Boden und Rammbar auf den Rammvorgang
- Wirkungsgrad des gesamten Rammsystems als Grundlage für eine Optimierung
- Spannungen im Pfahl bei der Rammung
- Untersuchung der Integrität eines Pfahles
- Statische Tragfähigkeit eines Pfahles

Hinsichtlich der Betonbeanspruchung während des Rammschlages ergaben sich zwischen den beiden Meßmethoden nur geringfügige Abweichungen. Die aufgetragenen Kraft- und Geschwindigkeitskurven zeigten an, daß der Pfahl überwiegend auf Spitzendruck trägt. Wie bereits erwähnt, konnte im Rahmen der Integritätsprüfung keine Bildung von klaffenden Rissen festgestellt werden.

12. Begleitkörperuntersuchungen

12.1 Litzenausziehversuche

12.1.1 Prüfkörper und Versuchsdurchführung

Die Litzenausziehversuche zur Bestimmung der Verbundspannungs-Verschiebungsbeziehung τ_v -v wurden im Rahmen von Vorversuchen durchgeführt. Die Baustoffe entsprachen denen, die bei den Versuchspfählen verwendet wurden. Bild 6 zeigt die Abmes-

sungen der Verbundprobe. Insgesamt wurden 10 Körper geprüft, wobei der Spannstahl bei 5 Körpern in der "oberen Lage" und bei den übrigen 5 Körpern in der "unteren Lage" war (Betonierichtung normal zur Litze, obere Lage, untere Lage, s. Bild 6). Die Ausziehkörper wurden schultergelagert geprüft. Zur Schlupfmessung war ein induktiver Wegaufnehmer angebracht, dessen Tauchanker das unbelastete Ende (Kerndraht) an-tastete. Bei einer Verschiebung von $v = 10,0$ mm wurde die Messung abgebrochen.

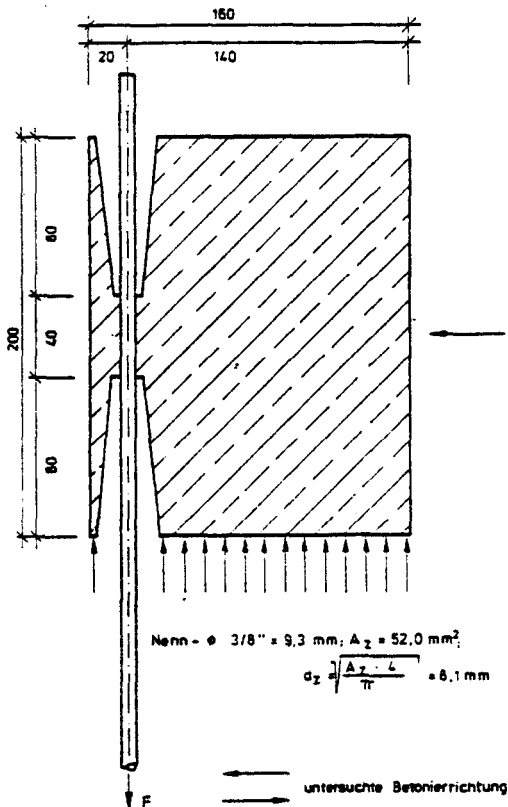


Bild 6 : Abmessungen der Ausziehkörper

12.1.2 Meßergebnisse

In den Bildern 29 und 30 sind die τ_v -v-Beziehungen für beide Betonierrichtungen bzw. für die beiden Lagen dargestellt. Die Linien verbinden die Mittelwerte aus den 5 Einzelergebnissen. Der Streubereich ist markiert.

Signifikante Unterschiede zwischen "oberer Lage" und "unterer Lage" sind hinsichtlich der gemittelten Verbundfestigkeit im Bereich geringer Verschiebungen nicht feststellbar.

Auffällig ist jedoch das erheblich breitere Streuband der Ergebnisse der oberen Lage.

12.2 Litzenausziehversuche an gerammten Pfahlköpfen

12.2.1 Ziel der Untersuchung, Versuchsmaterial u. Versuchsaufbau

Zur Ermittlung der Verbundfestigkeit zwischen Litze und Beton nach der Rammbeanspruchung wurden Ausziehversuche an abgetrennten Pfahlköpfen vorgenommen.

Die Köpfe stammten von Pfählen, die auf der gleichen Baustelle wie die Versuchspfähle unter den gleichen Bedingungen gerammt worden waren. Der Versuchsaufbau ist in Bild 31 dargestellt. Er besteht aus dem Pfahlkopf, der an seiner Stemmseite durch Polyestermörtel abgeglichen wurde. Auf dieser Ausgleichsschicht wurde eine Hohlkolbenpresse abgesetzt, um die erforderliche Zugkraft aufbringen zu können. Der Litzenschlupf wurde an der lastfreien Seite mit einem induktiven Wegaufnehmer gemessen. Insgesamt wurden aus 2 Pfahlköpfen 6 Litzen ausgezogen.

12.2.2 Meßergebnisse

Die Meßergebnisse sind in Tabelle 8 zusammengestellt. In Bild 32 wurden die Verbundfestigkeiten in Abhängigkeit von der Verschiebung ($v = 0,01; 0,1; 1,0 \text{ mm}$) zusammengestellt. Diese Tabelle enthält auch eine Skizze über die Lage der einzelnen Litzen beim Betonieren. Die ermittelten mittleren Verbundfestigkeiten weisen die für diesen Stahl typischen Streuungen auf, die durch die Rammbeanspruchung und den Abstemmvorgang noch verstärkt werden. Mit Werten von $\tau_{v 1,0} = 3,36 \dots 7,80 \text{ N/mm}^2$ liegen sie mit einer Ausnahme (Litze Nr. 4) im Streuband der vorgehend beschriebenen Versuche.

Die Annahme, daß die Rammung zu einer wesentlichen Verbundlockerung führt, kann nicht aufrechterhalten werden.

12.3 Untersuchung des Pfahlbetons

12.3.1 Allgemeines

Der Pfahlbeton wurde bei der MPA Braunschweig auf Druckfestigkeit und Spaltzugfestigkeit untersucht. Außerdem wurden der statische E-Modul und der E-Modul bei hoher Belastungsgeschwindigkeit bestimmt.

12.3.2 Druckfestigkeit des Betons

Zusammen mit den Versuchskörpern wurden 3 Betonwürfel mit einer Kantenlänge von 200 mm hergestellt, die unter den gleichen Bedingungen wie die Pfähle gelagert wurden.

Die Zusammensetzung des Betons wurde im Abschnitt 6.2 beschrieben. Die Prüfung erfolgte 3 Tage nach der Rammung.

Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfung :

Tag der Würfelherstellung	06.03.1981
Tag der Prüfung	08.05.1981
Prüfalter	63 Tage
Belastungsgeschwindigkeit	0,5 N/mm ² · s

Kennzeichnung der Würfel	Rohdichte kg/dm ³	Druckfestigkeit N/mm ²
Nr. 91	2,47	58,9
92	2,47	57,6
93	2,47	58,1
i.M. 2,47 kg/dm ³		i.M. 58,2 N/mm ²

Im Rahmen der Eigenüberwachung wurde im Alter von 28 Tagen eine Betondruckfestigkeit von $\beta_w = 51,7 \text{ N/mm}^2$ ermittelt.

12.3.3 Spaltzugfestigkeit

Die Untersuchung wurde an 2 zylindrischen Proben ($h/d=30/15$ cm) durchgeführt.

Ergebnisse der Spaltzugfestigkeitsprüfung

Tag der Probenherstellung : 06.03.1981
 Tag der Prüfung : 07.05.81 bzw. 12.05.81
 Prüfalter : 62 bzw. 67 Tage

Kennzeichnung der Zylinder	Rohdichte kg/dm ³	Spaltzugfestigkeit N/mm ²
4	2,43	3,81
3	2,39	3,66

12.3.4 Elastizitätsmodul

12.3.4.1 Statischer E-Modul

Der statische E-Modul wurde 7 Tage nach der Rammung an 2 zylindrischen Proben ($h/d=30/15$ cm) ermittelt.

Ergebnisse der E-Modulprüfung

Tag der Probenherstellung : 06.03.1981
 Tag der Prüfung : 12.05.1981
 Prüfalter : 67 Tage
 Belastungsgeschwindigkeit : $\sigma = 0,5$ N/mm² · s
 untere Prüfspannung σ_u : 0,56 N/mm²
 obere Prüfspannung σ_o : 16,51 N/mm²

Kennzeichnung der Zylinder	Rohdichte kg/dm ³	E-Modul N/mm ²	Druckfestigkeit β_p N/mm ²
2	2,44	32500	48,0
5	2,45	32100	48,0

12.3.4.2 Elastizitätsmodul bei hoher Belastungsgeschwindigkeit

Versuchsdurchführung

Zur Bestimmung des E-Moduls bei hoher Belastungsgeschwindigkeit wurde ein Zylinder, der aus dem selben Beton bestand wie der der Untersuchungspfähle, in einer Hydropulsanlage des Fabrikats Schenck geprüft.

Die Anlage konnte den Zylinder bis zu einer maximalen Druckspannung von $\max \sigma_b \sim 25 \text{ N/mm}^2$ belasten. Die dabei entstandenen Dehnungen wurden über 3 Betondehnmeßstreifen die in Zylinderlängsrichtung mit einem Winkel von 120° zueinander angebracht waren, gemessen.

Versuchskörper :

Betonzylinder $h/d = 30/15 \text{ cm}$

Tag der Probenherstellung 06.03.1981

Tag der Prüfung 28.08.1981

Betonalter 175 Tage

untere Prüfspannung $\sigma_u \sim 0,3 \text{ N/mm}^2$

obere Prüfspannung $\sigma_o \sim 25 \text{ N/mm}^2$

Anzahl der Belastungen $n = 31$

Belastungsgeschwindigkeit $\sigma \sim 2500 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}$

Wie aus dem folgenden Bild 7 zu sehen ist, wird die maximale Beanspruchung bei der Laboruntersuchung in etwa 10 msec erreicht. Bei der Rammbeanspruchung beträgt die Spannungszunahme dagegen etwa die 5-fache Geschwindigkeit.

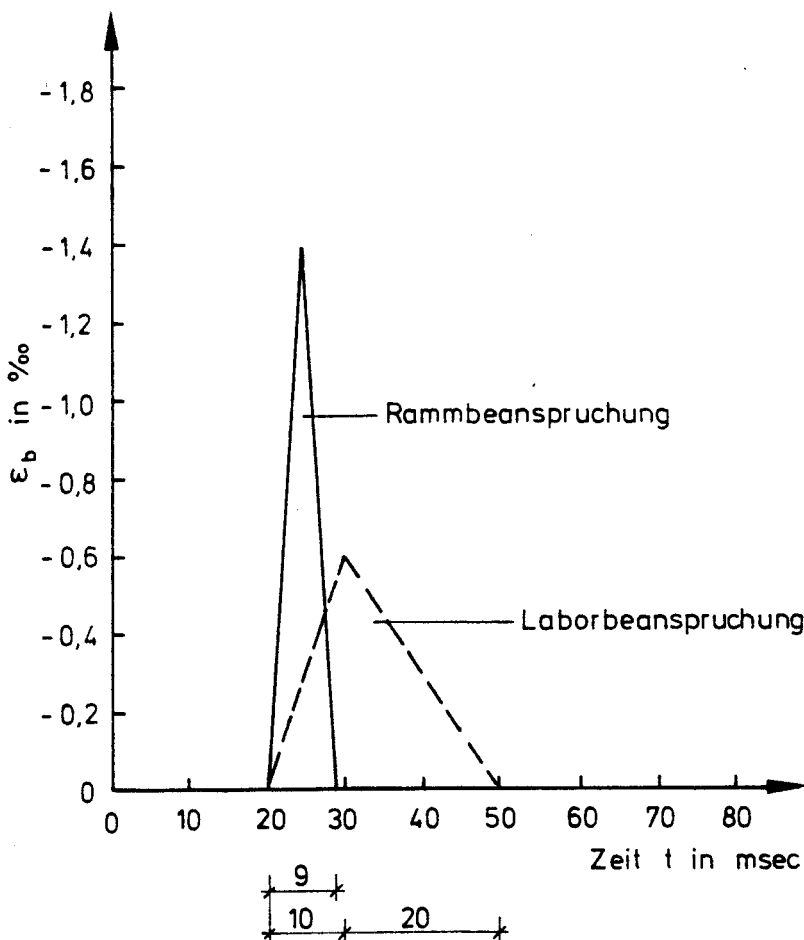


Bild 7: Zeitabhängige Betonbeanspruchung auf der Baustelle und im Labor

Versuchsergebnisse

In Tabelle 9 sind die aufgebrauchten Druckkräfte mit den zugehörigen Dehnungen zusammengestellt.

Der daraus errechnete E-Modul liegt mit durchschnittlich $E = 38660 \text{ N/mm}^2$ um etwa 20 % über dem statischen E-Modul. Eine eingehende Untersuchung des Einflusses der Belastungsgeschwindigkeit auf die Druckfestigkeit und den Elastizitätsmodul von Beton enthält [9].

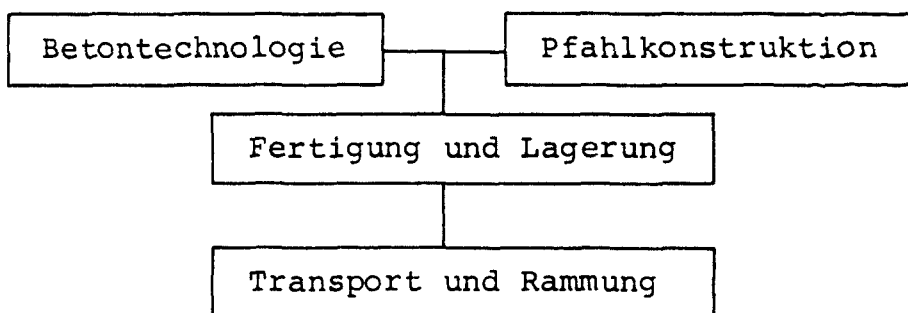
Obwohl die Betonbeanspruchung deutlich unter der bei der Rammung lag, zeigt sich bereits eine deutliche Zunahme der bleibenden Betondehnung.

Die Dehnungsmessungen an den Rammpfählen hatten eine bleibende Dehnung von $\max \epsilon_b = 0,2 \text{ ‰}$ erbracht.

13. Abschließende Bemerkungen

Die Herstellung von Pfahlgründungen aus Spannbetonpfählen verlangt während aller Arbeitsphasen ein hohes Maß an Sachkenntnis und Sorgfalt. Sofern diese Voraussetzungen erfüllt werden, stellen sie eine dauerhafte und im allgemeinen wirtschaftliche Problemlösung dar.

Die zu erfüllenden Voraussetzungen lassen sich schlagwortartig wie folgt skizzieren :



Betontechnologie

Hier sei auf die Arbeit von Dahms [10] verwiesen.

Er untersuchte, von welchen Parametern die Schlagfestigkeit des Betons beeinflusst wird :

- Zementgehalt und Zementgüte; Wasserzementwert
- Zuschlag (Kornform und E-Modul des Zuschlags)
- Kornzusammensetzung

Um einen möglichst schlagfesten Beton zu erhalten, werden von Dahms eine Reihe von Maßnahmen empfohlen :

- Feuchtlagerung des jungen Betons über einen Zeitraum von 7 Tagen
- Mindestalter des Betons bei der Rammung : 28 Tage
- Der Pfahl sollte während der Rammung möglichst trocken sein.

Pfahlkonstruktion

Rammpfähle aus Stahlbeton oder Spannbeton sind in Längs- und Querrichtung zu bewehren. Die Längsbewehrung bzw. die Vorspannung dient zur Aufnahme von Zug- und Biegezugspannungen während des Transports und der Rammung sowie zur Aufnahme von Bauwerkslasten. Die notwendige Mindestbewehrung in Längsrichtung kann zur Zeit nicht abschließend festgelegt werden, da unser Wissensstand insbes. bezüglich der rammbedingten Zugspannungen zu klein ist. Von großer Bedeutung für die Rammbarkeit eines Pfahles ist dessen Querbewehrung. Nach der heutigen Regelung in DIN 4026 sinkt die Mindestquerbewehrung mit zunehmender Querschnittsfläche des Pfahles. Als Mindeststahlgüte wird BSt I G angegeben. Bei den Versuchspfählen war eine Querbewehrung der Güte BSt IV G entsprechend dem Beiblatt zur DIN 4026 vorhanden. Obwohl sich diese Bewehrung bei der Versuchsrammung als ausreichend herausstellte, wären zu dieser Frage systematische Untersuchungen insbes. mit Pfählen größeren Querschnitts und bei härterer Rammung wünschenswert.

Fertigung und Lagerung

Bei der Herstellung von vorgespannten Pfählen hat der Oberflächenzustand der Spannstähle entscheidenden Einfluß auf das Verbundverhalten. Die Stähle müssen fettfrei sein, eine Benetzung mit Schalungsöl ist zu vermeiden. Bei der Verdichtung des Betons durch Innenrüttler dürfen die Spannstähle besonders im Pfahlkopfbereich möglichst nicht berührt werden, da andernfalls infolge Sedimentation und Luftporenbildung eine deutliche Verbundverschlechterung eintritt.

Zum Problem der Pfahllagerung sind vorstehend einige Empfehlungen von Dahms genannt.

Transport und Rammung

Die Pfähle sind vorsichtig auf die Baustelle zu transportieren und sachgerecht anzuheben. Die Anschlagpunkte für das Ladegeschirr müssen der statischen Berechnung entsprechen. Aus den Versuchsergebnissen geht hervor, daß durch die Rammbeanspruchung der Beton bis in die Nähe seiner Festigkeit ausgenutzt wird. Aus diesem Grunde kommt einer sachkundigen Rammung entscheidende Bedeutung zu, wobei einer falschen Rammung nicht durch konstruktive oder betontechnologische Maßnahmen begegnet werden kann.

14. Zusammenfassung

Es wird über Untersuchungen an 3 vorgespannten Betonrammpfählen berichtet, die im Mai 1981 einer Versuchsrammung unterzogen wurden.

Die Untersuchung sollte zur Klärung der Frage beitragen, inwieweit Spannbetonpfähle Rißbildung aufgrund der Rammbeanspruchung zeigen und in welchem Maße die Eintragungslängen in den Pfahlendbereichen durch diese Beanspruchung vergrößert werden.

Zur Beantwortung der genannten Fragen wurden die Betondehnungen während des Rammschlages gemessen, die Pfähle wurden auf Rißbildung untersucht, und es wurde die Veränderung der Eintragungslänge bestimmt. An Begleitkörpern wurde weiterhin u.a. die Verbundfestigkeit zwischen Litze und Beton an gerammten und ungerammten Proben untersucht. Die Messungen ergaben, daß während des Rammschlages maximale Druckdehnungen von $\epsilon_b = -1,4 \text{ }^{\circ}/\text{oo}$ auftreten. Zugdehnungen wurden nicht festgestellt, was hauptsächlich auf die auf der Baustelle angetroffenen Bodenverhältnisse zurückzuführen ist. So waren auch keine rammbedingten Risse in Querrichtung feststellbar. Von wesentlicher Bedeutung für die Verbundverankerung ist, daß die Pfähle in Längsrichtung speziell im Pfahlkopfbereich keine Rißbildung aufwiesen.

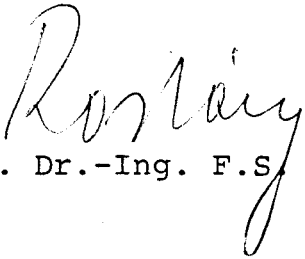
Hinsichtlich der Bestimmung der Eintragungslänge ergaben diese Messungen eine Vergrößerung von 60 cm auf etwa 80 cm Länge. Mit Hilfe von Litzenausziehversuchen an gerammten Pfahlköpfen konnte nachgewiesen werden, daß die Rammung kein Verbundversagen erzeugen muß. Die ermittelten Spannstahlspannungsverluste sind dagegen auf die Kompression des Betons und die damit verbundene Querdehnung zurückzuführen. Die Ergebnisse zeigen, daß bei sachgerechter Rammung keine Notwendigkeit besteht, Spannbetonrammpfähle mit schlaffer Längsbewehrung zu versehen.

Die Verfasser danken Herrn H. Wülfken von der Firma BINAB GmbH, Seevetal-Rammelsloh, für die Unterstützung bei der Versuchsdurchführung sowie Herrn Dr.-Ing. Vogt, Schleswig, für seine Diskussionsbereitschaft.

Unser Dank gilt auch den Herren Dipl.-Ing. H. Meseck und
Dipl.-Ing. J. Knüpfer vom Lehrstuhl für Grundbau und
Bodenmechanik der TU Braunschweig für die Durchführung
der Dynamischen Pfahltests.

Braunschweig, Januar 1982

Der Direktor



(Prof. Dr.-Ing. F.S. Rostásy)

Die Sachbearbeiter



(Dipl.-Ing. B. Kepp)



(Dipl.-Ing. A. Rohling)

15. Literaturverzeichnis

- [1] Gerwick, B.C. : Prestressed Concrete Piles,
PCI-Journal, Oktober 1968
- [2] Li, S. u. Liu, T.C. : Prestressed Concrete Piling-Contemporary
Design Practice and Recommendations;
ACI Journal, März 1970
- [3] DIN 4026 - Rammpfähle - Herstellung, Bemessung
und zulässige Belastung (Ausgabe 8.75)
- [4] Vogt, H. : Die inneren Beanspruchungen eines
Rammpfahles während des Rammens;
Beton- und Stahlbetonbau 8/1980
- [5] Dijst, G. : Messen der beim Rammen von Gründungs-
pfählen auftretenden Pfahlkopf-Bean-
spruchungen
Meßtechnische Briefe 15(1979) H.3
- [6] Richtlinie für die Prüfung von Spannstählen auf ihre
Eignung zur Verankerung durch sofortigen Verbund
Institut für Bautechnik 6/1980
- [7] Ruhnau, J. und : Spaltzug-, Stirnzug- und Schubbewehrung
Kupfer, H. im Eintragungsbereich von Spannbett-
trägern - Beton- und Stahlbetonbau 7/1977
- [8] Wölfel, E. und : Verbundverankerung von Spannstählen-
Krüger, F. Zulassungsprüfung und Anwendungsbe-
dingungen - Inst. f. Bautechnik 6/1980 -
- [9] Wesche, K. und : Der Einfluß der Belastungsgeschwindig-
Krause, K. keit auf Druckfestigkeit und Elastizi-
tätsmodul von Beton
Materialprüfung 14 (1972) Nr. 7
- [10] Dahms, J. : Die Schlagfestigkeit des Betons
Dissertation 1968, TU Braunschweig

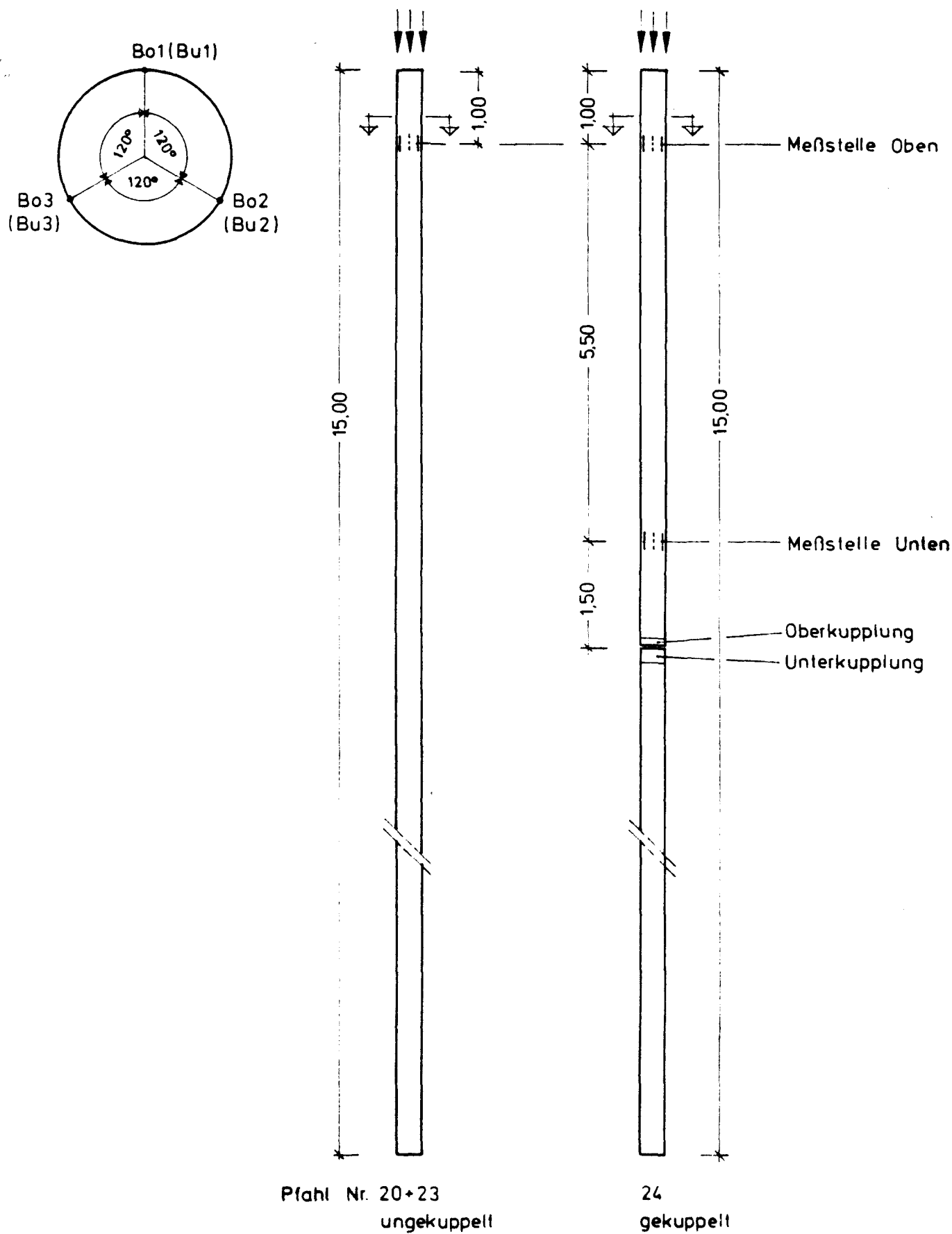
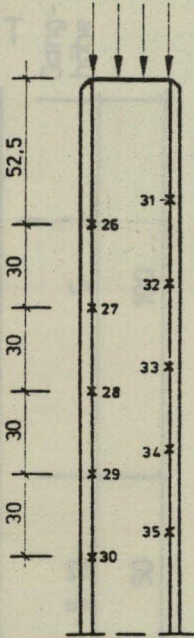
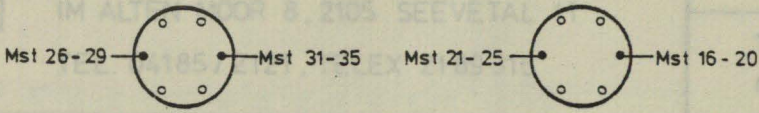


Bild 8 : Anordnung der Betondehnmeßstreifen

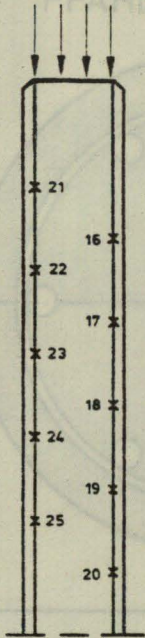
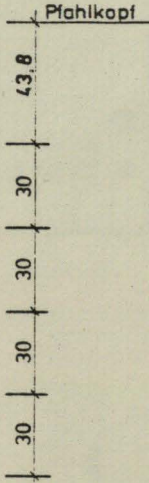


Bild 9 : Applikation eines Betondehnmeßstreifens bei Pfahl Nr. 24

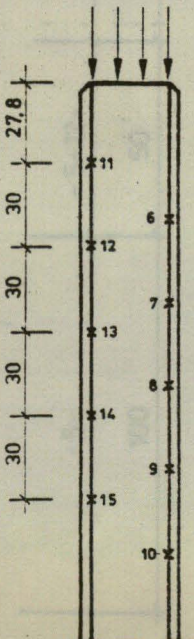
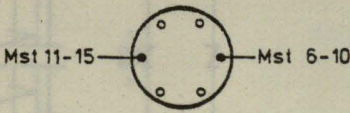
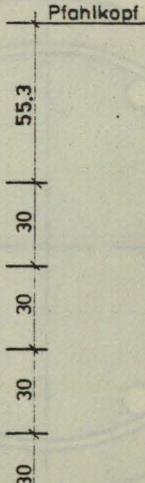
Anlage 3



Pfahl 20



Pfahl 23



Pfahl 24 gekuppelt

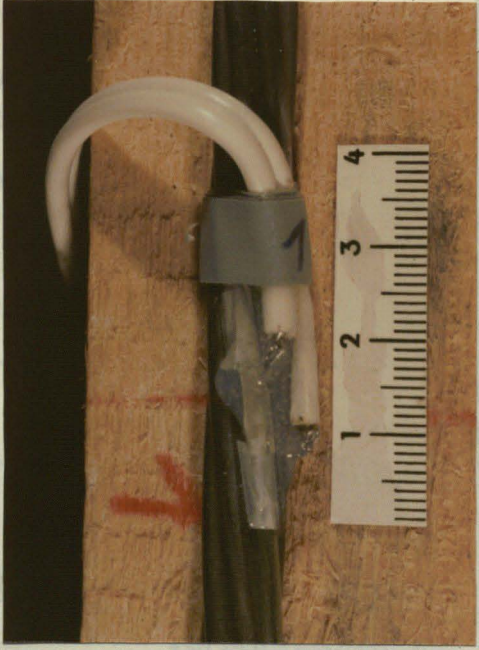
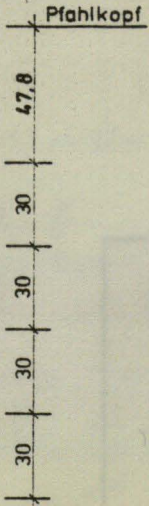


Bild 10: Anordnung der Litzendehnmessstreifen



BAU-U. INDUSTRIESERVICE GmbH

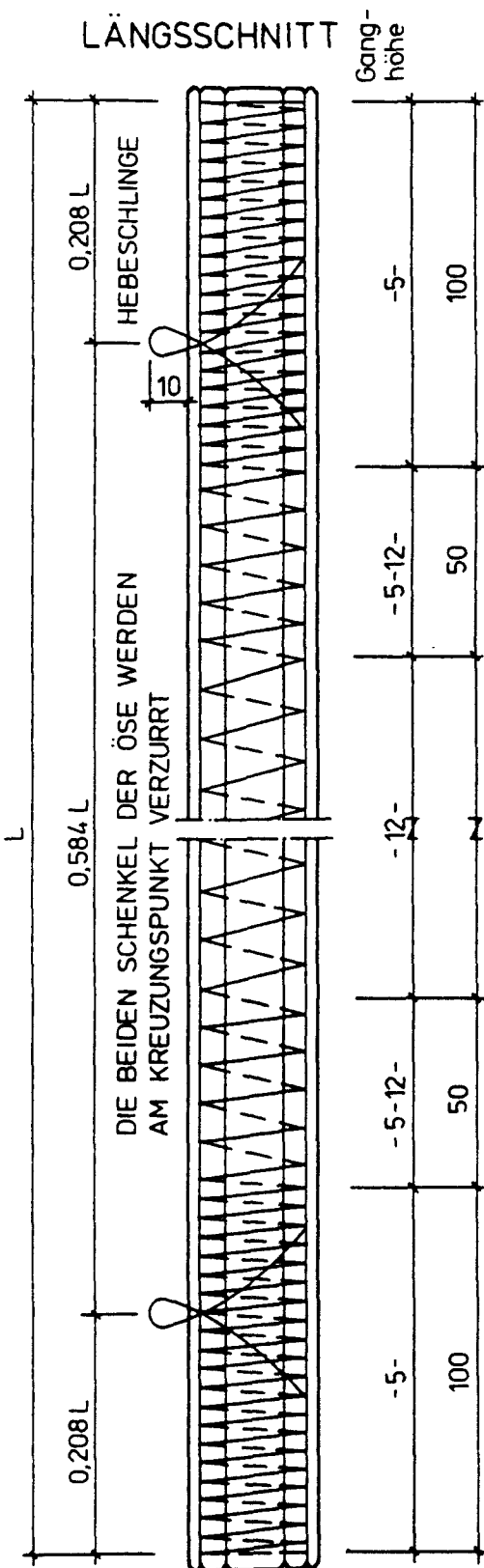
IM ALTEN MOOR 8, 2105 SEEVETAL 11

TEL. 04185 / 2121, TELEX 2189 316

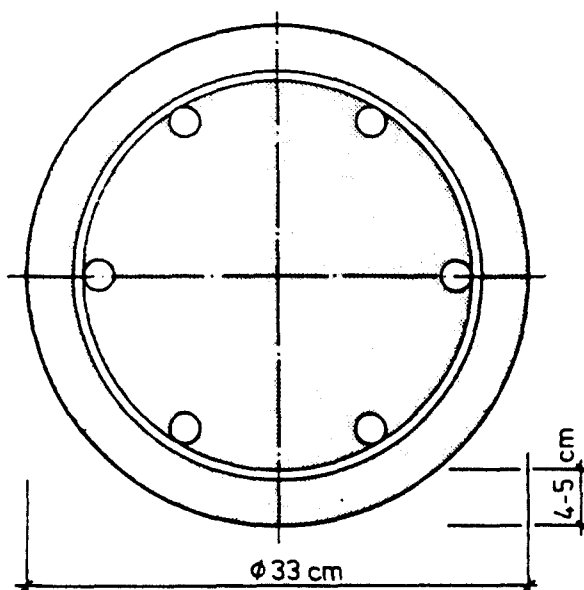
BINAB
StahlbetonrammpfähleTypengeprüfter Spannbeton-
rammpfahl $\phi 33$ cm

Anlage 1

LÄNGSSCHNITT



PFAHLQUERSCHNITT



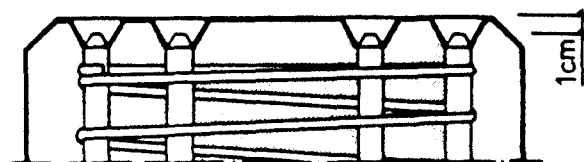
VORSPANNUNG:

ERFORDERLICHE DEHNUNG: $5,10 \text{ mm/m}$ ERFORDERLICHE BETONFESTIGKEIT BEIM
SPANNEN: 32 N/mm^2

BETON: B 45

SPANNDRAHTLITZEN: St 1570/1770, Aus 7 Drähten $\phi 3 \text{ mm}$ WENDEL: BSt 500/550, $\phi 5 \text{ mm}$

AUSBILDUNG DER PFAHLENDEN

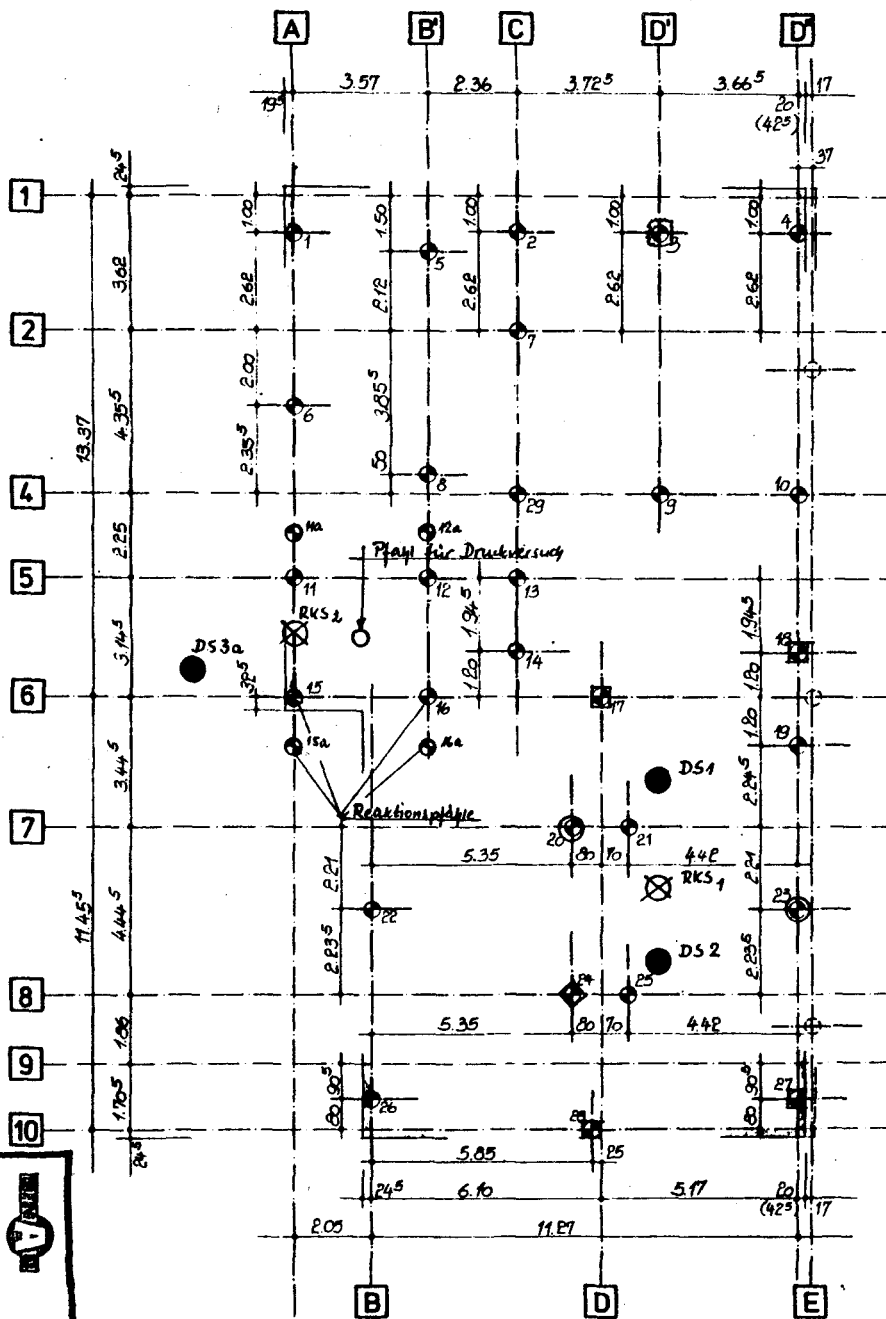
Anm.: Die Umschnürungsbewehrung wird
mit einem ganzen Umlauf abgeschlossen.Bild 11: Bewehrung der
Versuchspfähle

Konstruktive Bearbeitung:
Ingenieurbüro DR.-ING. HELMUT VOGT
Lollfuß 71
2380 SCHLESWIG

Telefon (046 21) 25630
<http://www.bau-u-industrieservice.de> 074

27/08/2015

Bild 12: Pfahlpilan



Pfähle mit PDA gemessen
Nr. 18, 19, 20, 24, 23
Nr. 3 nur Naßrammung

Testpfähle mit einbetonierten DHS
Nr. 20, 23
Nr. 24 gekuppelter Pfahl

Testpfähle mit Verbundunterbrechung
an 2 Spannweiten 30cm vom Kopf.
Nr. 17, 18, 27 und 28

DS = Drucksondierung

RKS = Rammkernsondierung

Pfahlliste

Pfahl Nr.	Kapphöhe (m)
Bezug: $\pm 0,00m \hat{=}$ Oberkante Rohdecke Kellergeschoß	
1,2	- 2,75
3,4	- 1,00
5	- 3,05
6,7	- 2,75
8	- 3,05
9	- 1,00
10	- 1,00
11 - 13	- 3,05
14 - 16	- 2,75
17	- 0,80
18,19	- 1,00
20,21	- 0,80
22,23	- 1,00
24,25	- 0,80
26 - 28	- 1,00
29	- 2,75

Pfahlart vorgespannte Stahlbetonrammpfähle
Pfahllängen: 14m (nach Probebelastung
bzw. Rammkriterien)

Querschnitt: $\varnothing 33cm$
zul. Pfahllast: 650 kN
Pfahlanzahl: 29 Stück

BINAB

Bau- und Industrieservice GmbH

Bauvorhaben: Carsten Börger Str.

Bremerhaven

Schichtenverzeichnis

Arbeits-Nr.

Seite

Datum

4.16.1981

Unterschrift

Wille

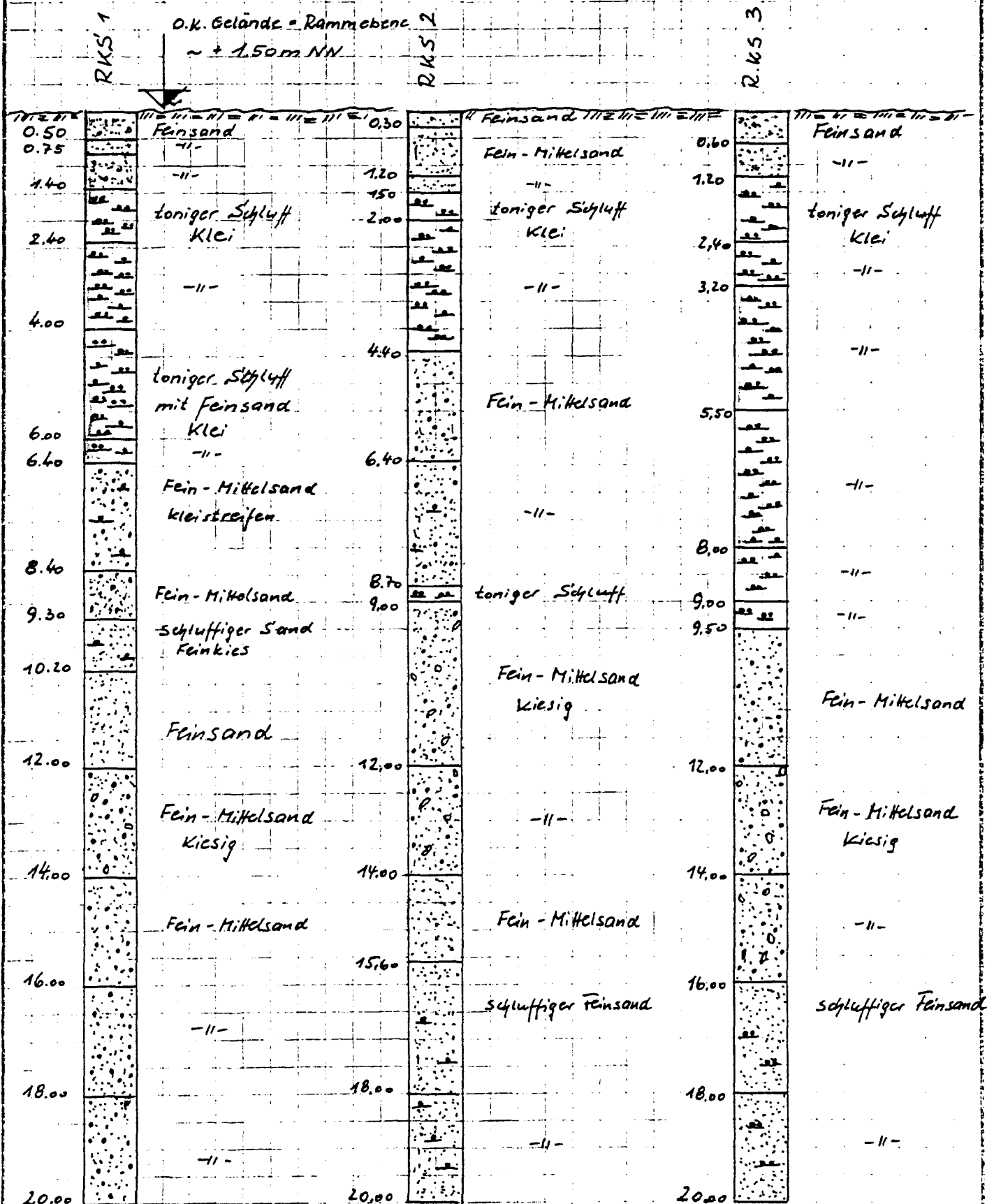
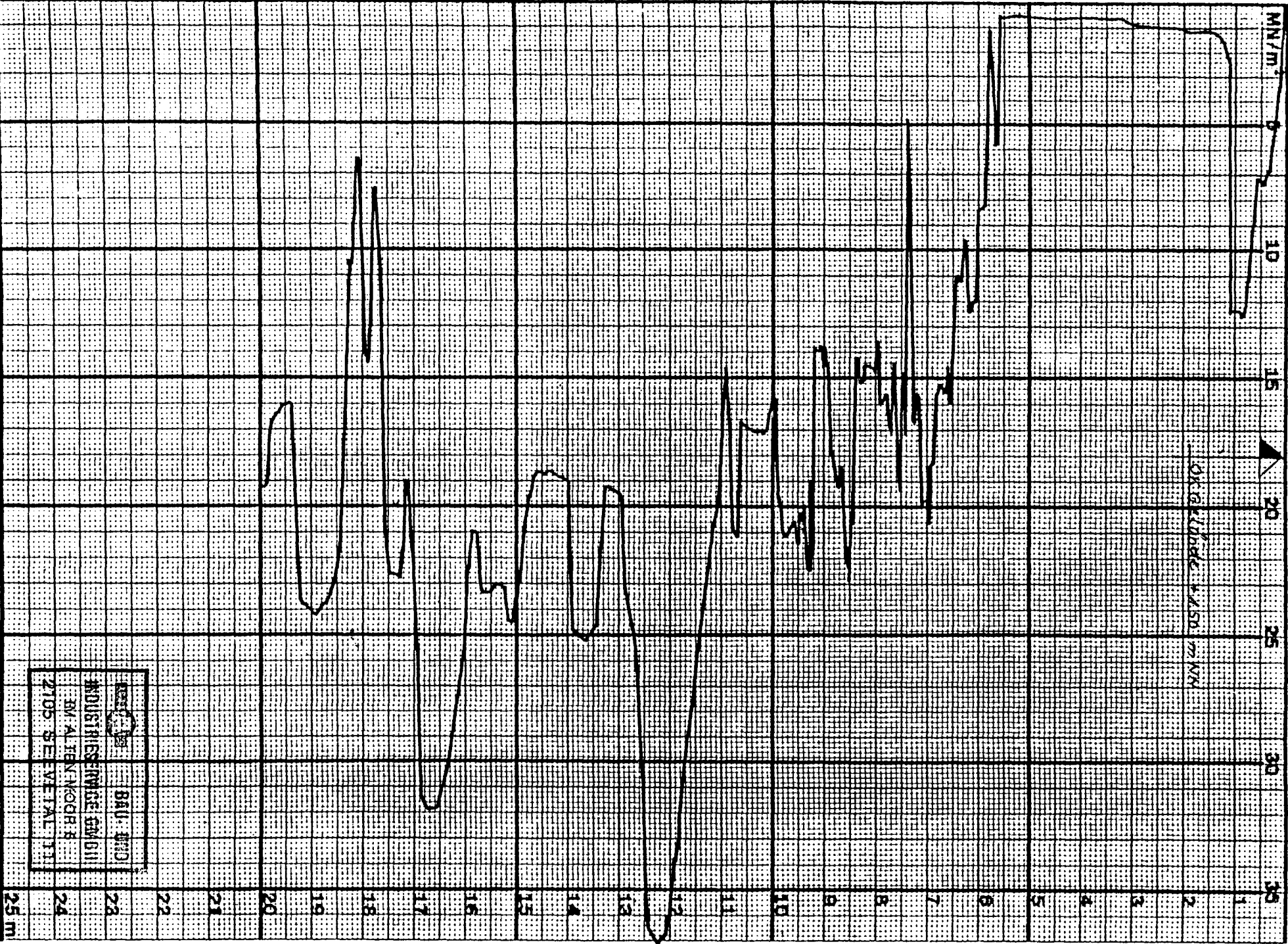


Bild 13



BAU- UND
INDUSTRIESERVICE GMBH
IM ALTEN MOOR 8
2105 SEEVETAL 11



Dat.: 9-5-81

Sond.-Nr.: DS 1

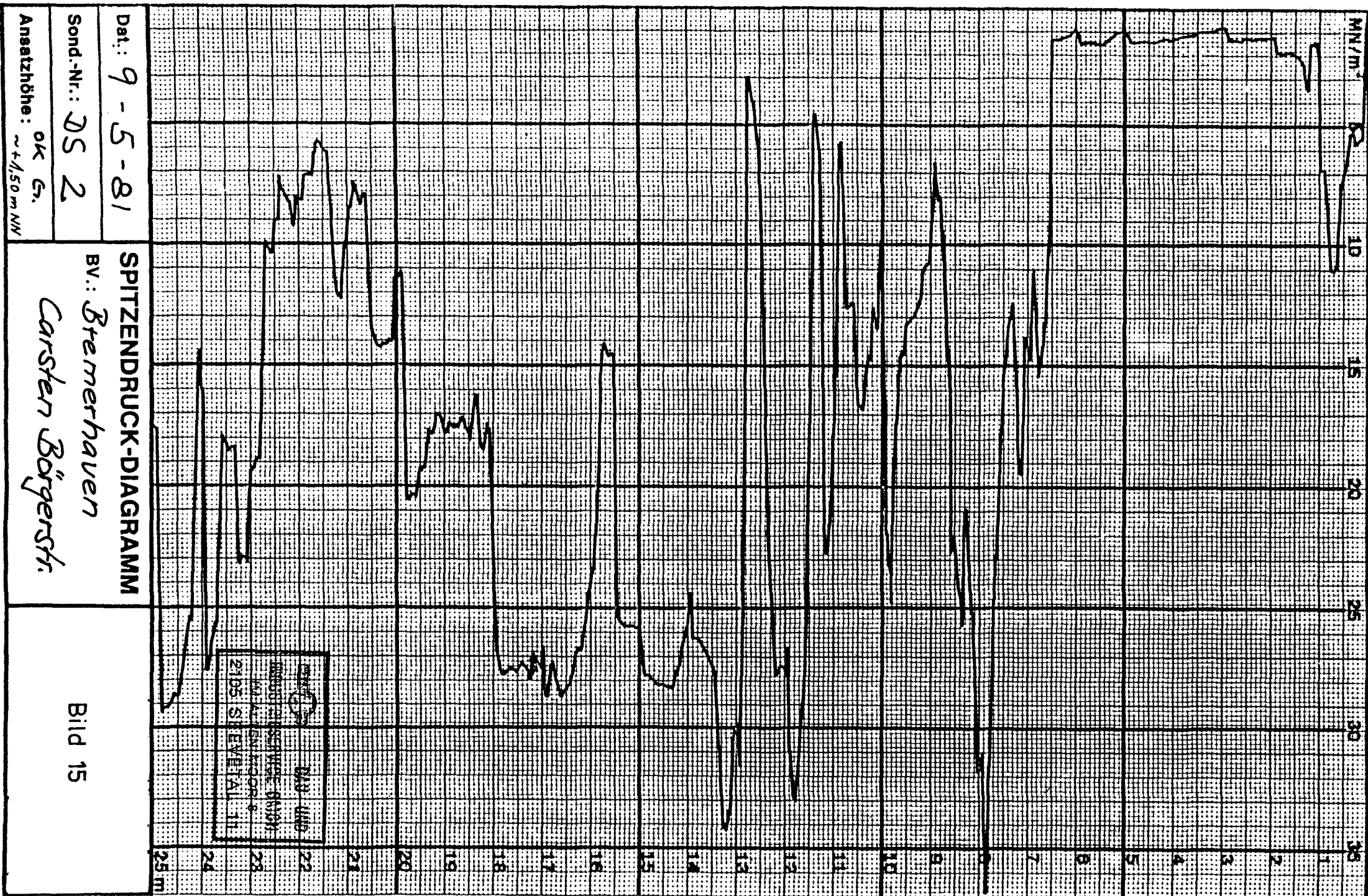
Ansatzhöhe: ok. G.
~ +1,50 m NN

SPITZENDRUCK-DIAGRAMM

BV.: Bremerhaven

Carsten Bürger Str.

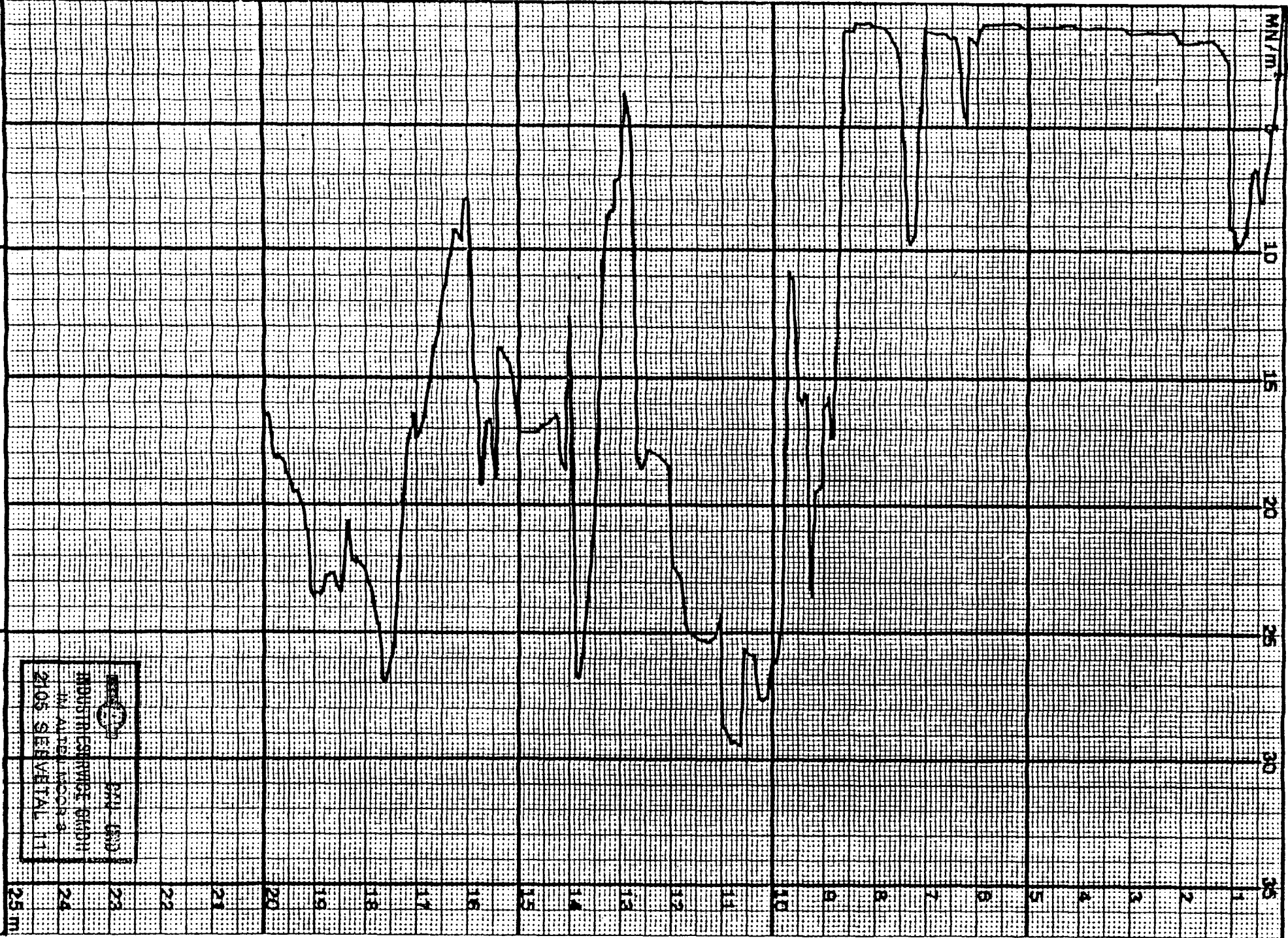
Bild 14



Dat.: 9 - 5 - 81
 Sond.-Nr.: DS 2
 Ansatzhöhe: ok G.
 ~+1,50 m NN

SPITZENDRUCK-DIAGRAMM
 BV.: Bremerhaven
 Carsten Bögersh.

Bild 15

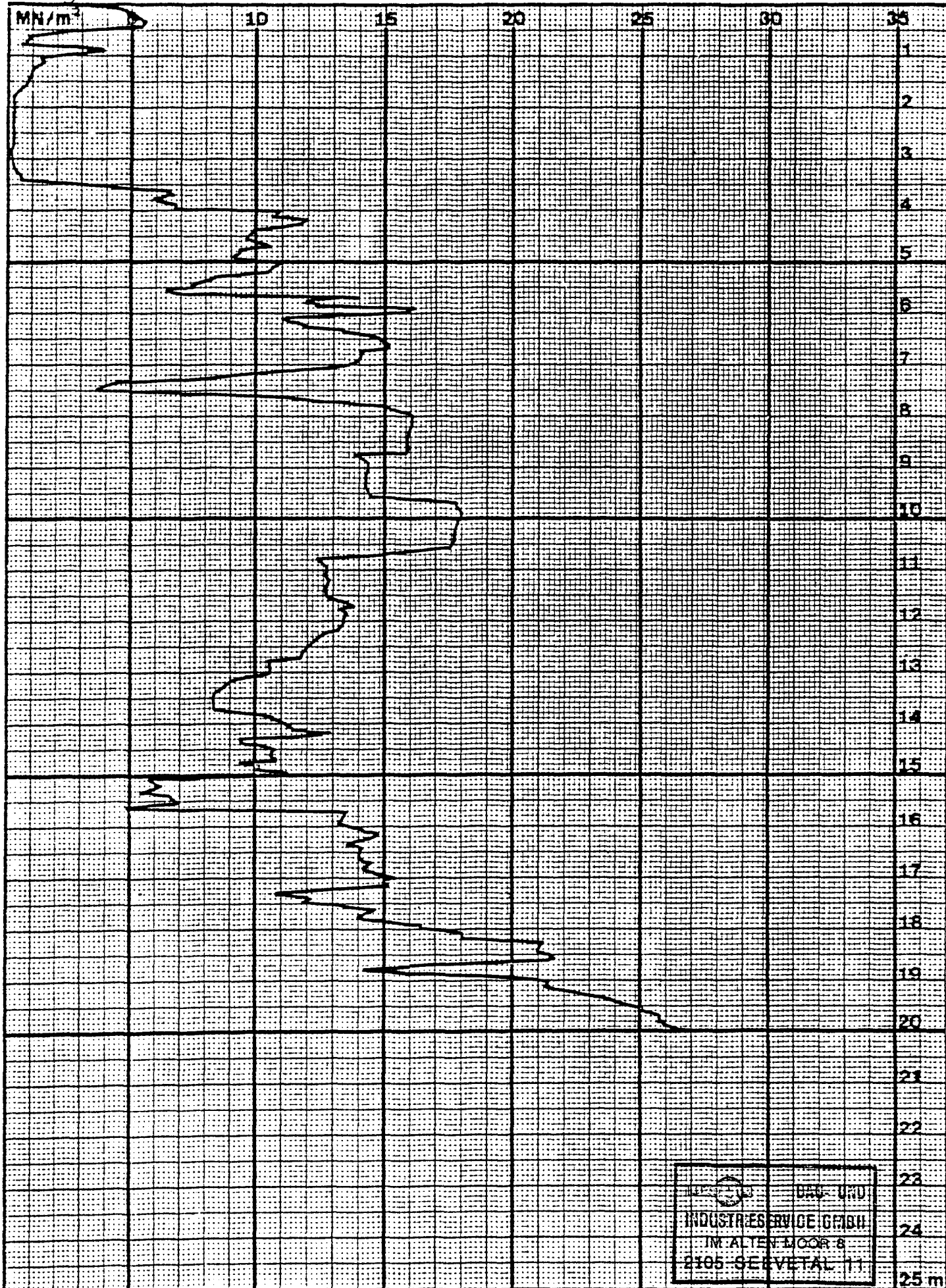


Dat.: 9 - 5 - 81
Sond.-Nr.: DS 4
Ansatzhöhe: ok G.
~ 1,50 m NW

SPITZENDRUCK-DIAGRAMM
bv.: Bremerhaven
Carsten. Börgerstr.

Bild 16

Anlage 10



Dat.: 9-5-81

Sond.-Nr.: DS 3a

Ansatzhöhe: OK G.
~ +1,50m NN

SPITZENDRUCK-DIAGRAMM

BV.: Bremerhaven

Carsten Börgerstr.

Bild 17

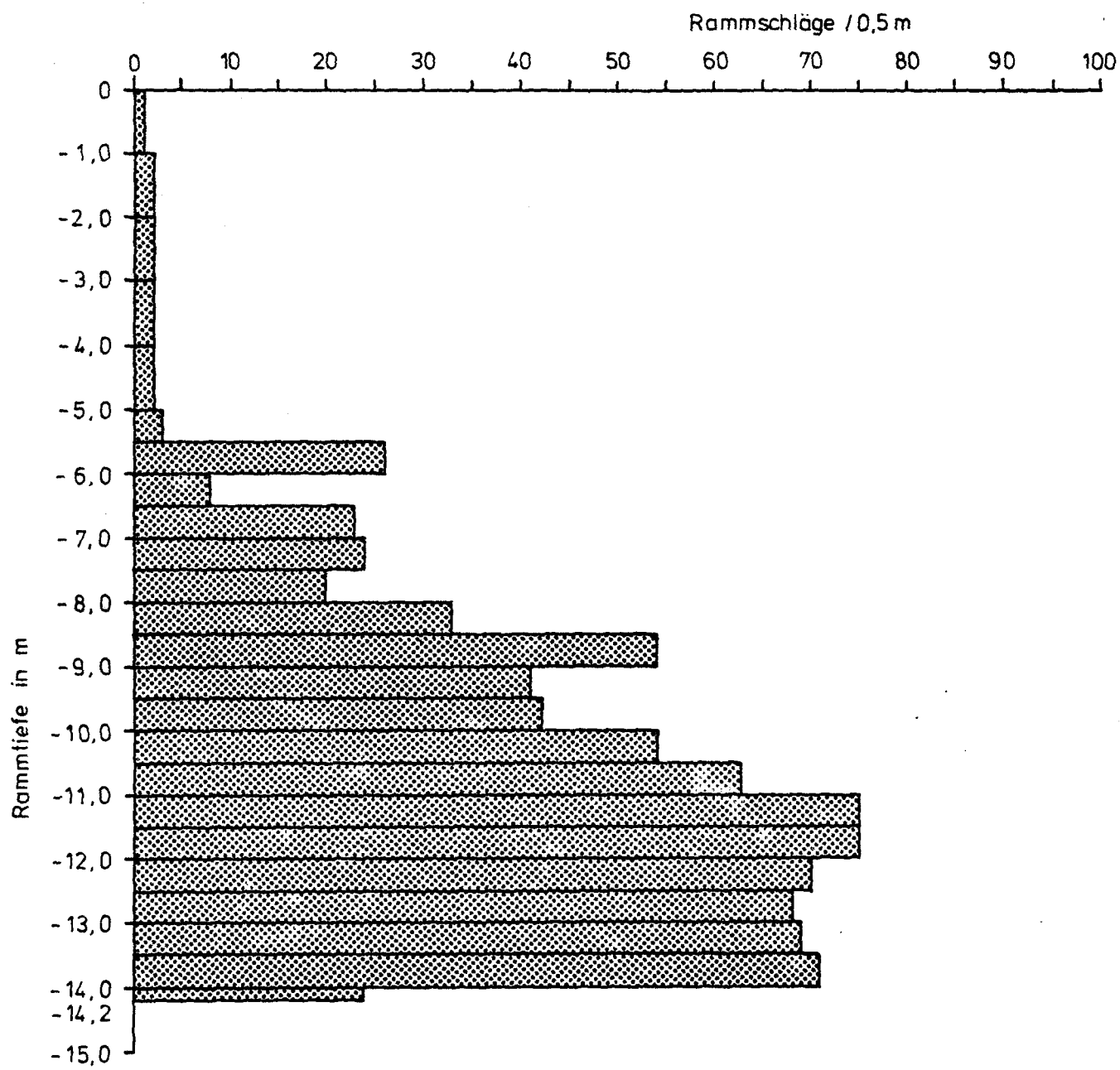


Bild 18 : Rammprotokoll Pfahl 20

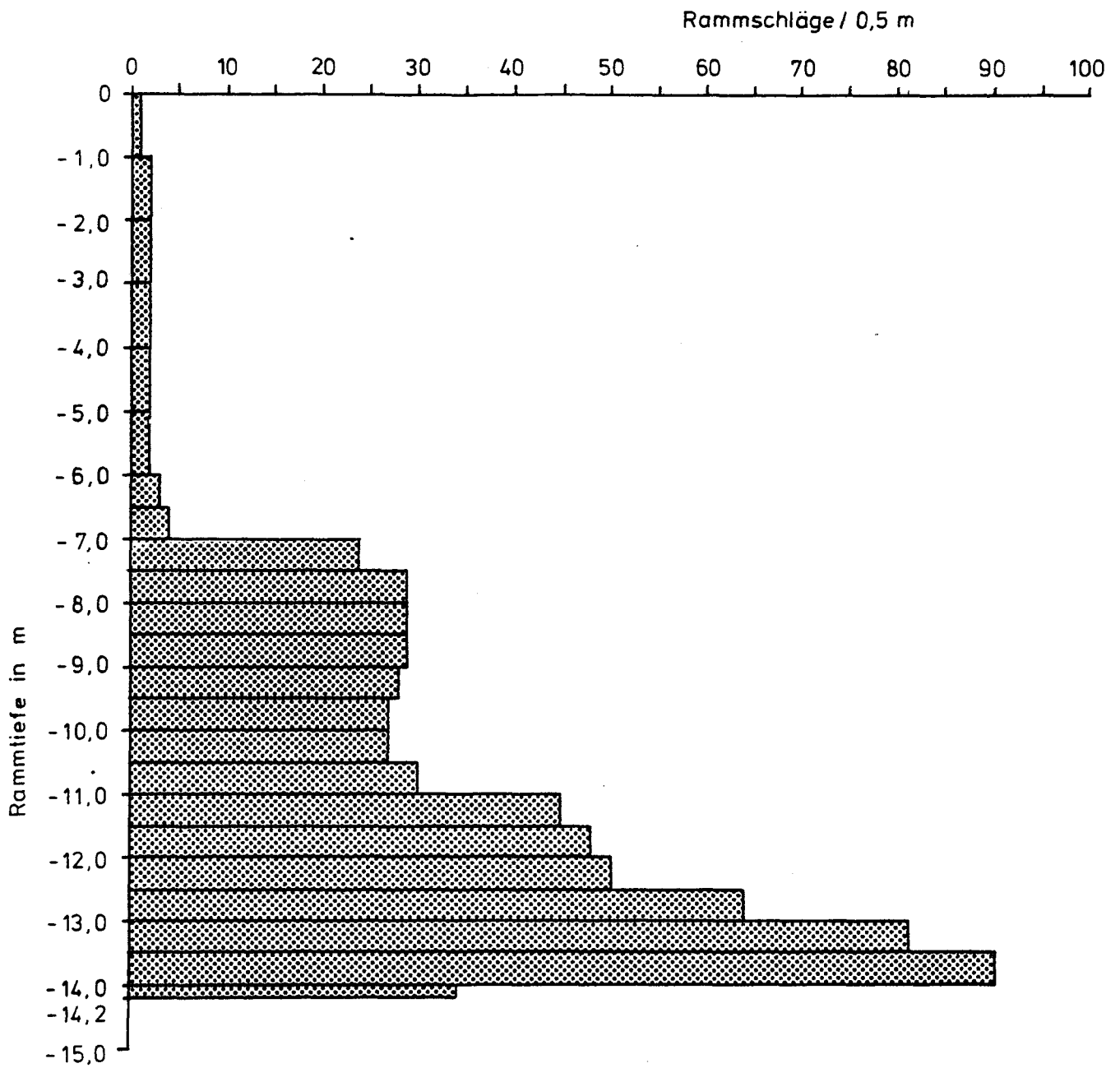


Bild 19 : Rammprotokoll Pfahl 23

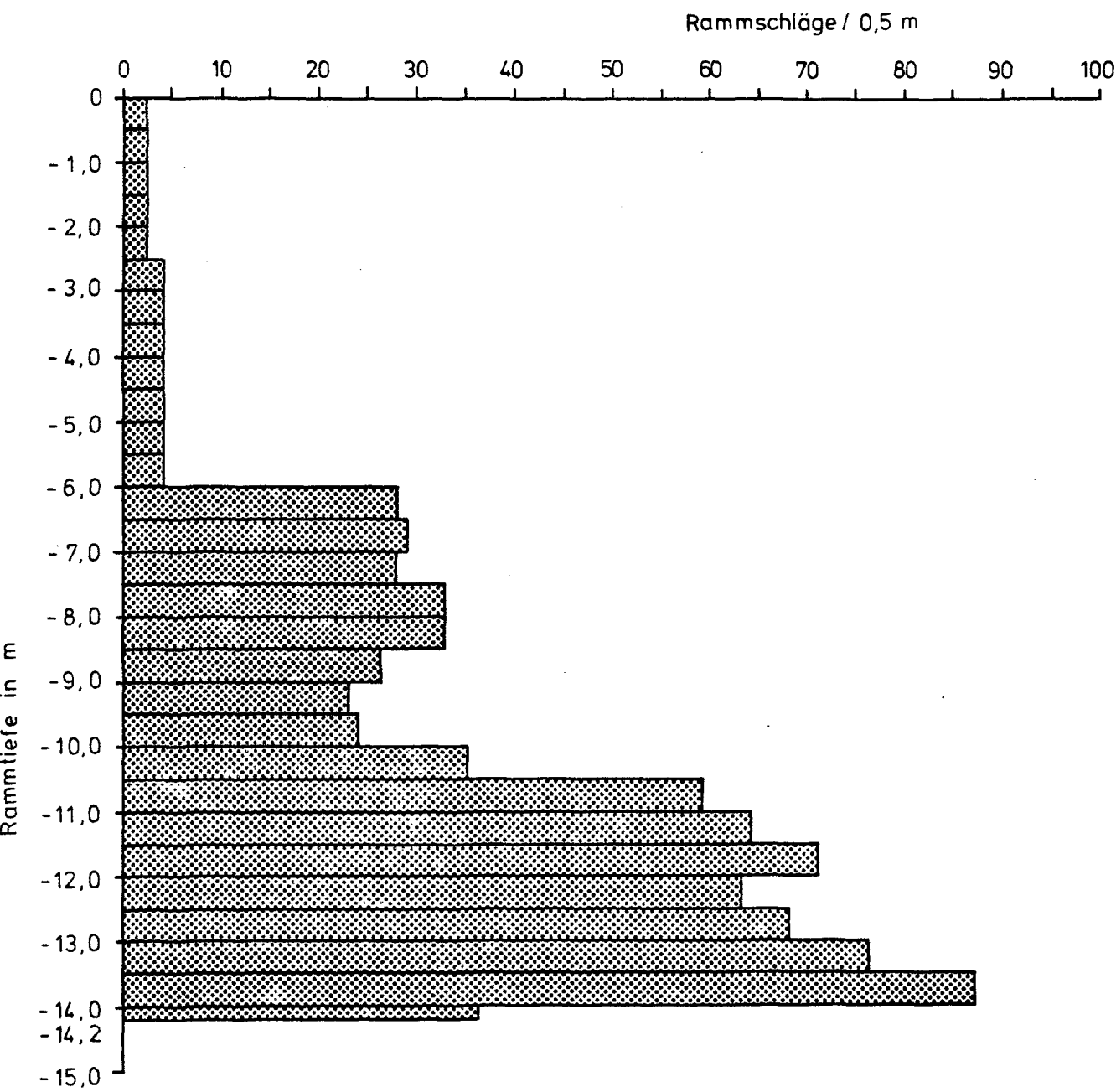


Bild 20 : Rammprotokoll Pfahl 24

Anlage 14

Tabelle 3 : Ergebnisse der Betondehnungsmessungen bei Pfahl 2o

Pfahl Nr.2o	ϵ_b ‰				$\epsilon_{b,m}$	ϵ_b ‰				$\epsilon_{b,m}$
	Meßstelle					Meßstelle				
	Schlagzahl	BU1	BU2	BU3		\overline{BU}	BO1	BO2	BO3	
2oo	-	o,64	o,82	o,73		o,65	o,65	o,76	o,69	
4oo	o,73	o,91	1,09	o,91		o,71	o,83	o,94	o,83	
54o	o,77	o,95	o,91	o,88		o,87	o,75	1,05	o,89	
6oo	o,82	o,95	o,82	o,86		o,8o	o,85	1,06	o,9o	
75o	o,82	o,91	o,82	o,85		o,87	o,81	1,06	o,91	
8oo	o,77	o,91	o,73	o,8o		o,84	o,79	1,03	o,89	

BU1 - BU3 - Betondehnmeßstellen am Pfahlschaft
BO1 - BO3 - Betonmeßstellen am Pfahlkopf)vergl. Anlage
 \overline{BU} ; \overline{BO} : Mittlere Betondehnung aus den Werten BU1-BU3 bzw. BO1 - BO3

Tabelle 4 : Ergebnisse der Betondehnungsmessungen bei den Pfählen 23 und 34

Pfahl Nr.23	$\epsilon_b^{\circ}/\infty$				$\epsilon_{b,m}$	Pfahl Nr.24	$\epsilon_b^{\circ}/\infty$				$\epsilon_{b,m}$
	Meßstelle						Meßstelle				
	Schlagzahl	BO1	BO2	BO3			\overline{BO}	Schlagzahl	BO1	BO2	
115	0,60	0,87	1,03	0,83		130	0,64	0,43	0,54	0,54	
200	0,60	0,92	1,03	0,85		200	0,71	0,49	0,71	0,64	
300	0,73	1,13	1,14	1,00		300	0,75	0,58	0,86	0,73	
380	0,75	1,26	1,29	1,10		370	0,78	0,68	0,95	0,80	
490	1,13	1,13	1,41	1,22		500	0,78	0,72	0,98	0,83	
550	1,04	1,13	1,41	1,19		610	0,80	0,70	1,00	0,83	
						790	0,69	0,49	0,79	0,66	

Anlage 15

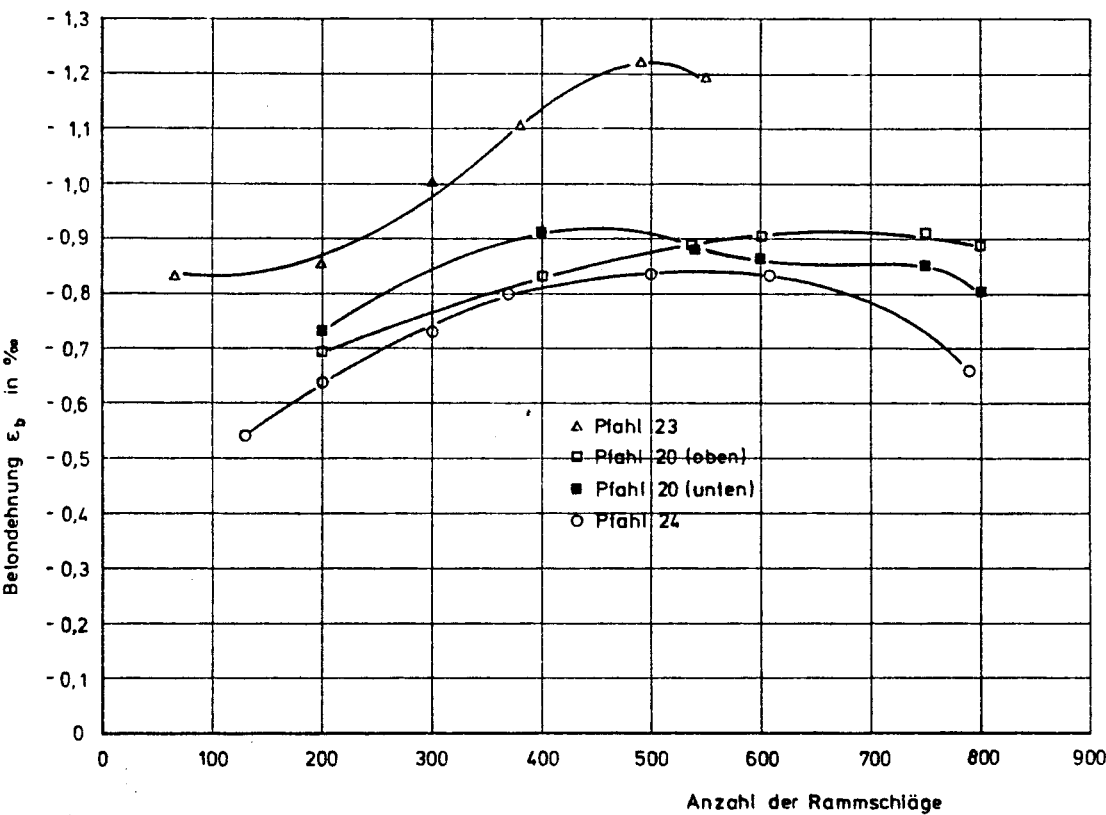


Bild 21 : Mittlere maximale Betondehnungen $\epsilon_{b,m}$ während des Rammschlags

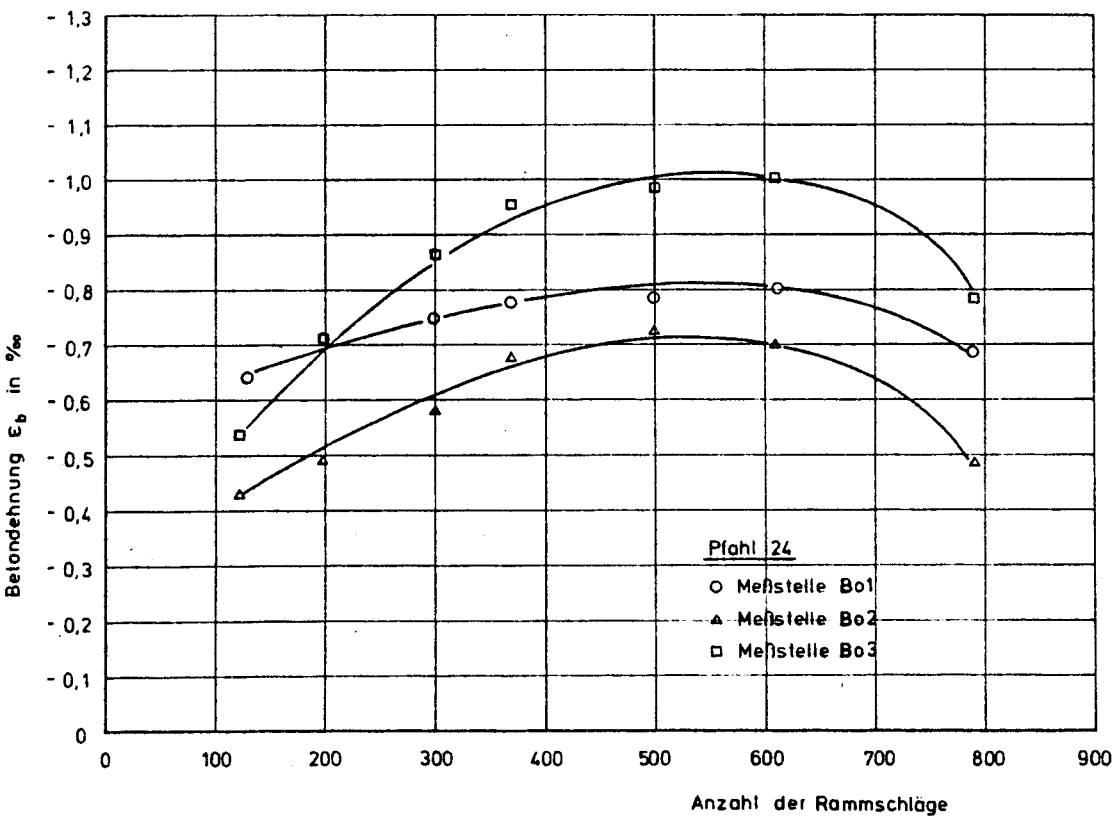


Bild 22 : Maximale Betondehnung ϵ_b bei Pfahl 24
Darstellung der 3 Einzelergebnisse

Tabelle 5 : Ergebnisse der Übertragungslängenuntersuchung für Pfahl 2o

MSt Nr. MSt-Abstand vom Pfahlkopf [cm]	26 50,8	27 77,3	28 103,8	29 130,3	31 42,0	32 68,5	33 95,0	34 121,5	35 148,0
Pfahlalter/Schlagzahl	F_w/F_o				F_w/F_o				
t = 0d	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
t = 56d n = 0	0,90	0,92	0,95	0,95	0,80	x)	0,95	0,93	0,99
200	0,90	0,92	0,95	0,95	0,70		0,93	0,92	0,98
400	0,89	0,92	0,94	0,94	0,61		0,93	0,92	0,98
600	0,89	0,91	0,94	0,93	0,53		0,92	0,91	0,97
800	0,86	0,91	0,93	0,83	0,47		0,92	0,91	0,97

x) Meßstellenausfall

Tabelle 6 : Ergebnisse der Übertragungslängenuntersuchung für Pfahl Nr. 23

MSt Nr.	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
MSt - Abstand vom Pfahlkopf[cm]	53,5	80,0	106,5	133,0	159,5	35	61,5	88,0	114,5	141,0
Pfahlalter Schlagzahl	F_w/F_o					F_w/F_o				
t = 0d	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
t = 56d n = 0	0,83	0,93	0,94	0,94	0,94	x)	0,88	0,94	0,94	0,94
n = 200	0,82	0,92	0,93	0,93	0,93		0,87	0,91	0,91	0,91
n = 400	0,77	0,90	0,91	0,91	0,91		0,80	0,90	0,90	0,90
n = 587	0,67	0,88	0,88	0,89	0,89		0,50	0,80	0,89	0,89

x) Meßstellenausfall

Tabelle 7 : Ergebnisse der Übertragungslängenuntersuchung für Pfahl Nr. 24

MSt Nr.	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
MSt-Abstand vom Pfahlkopf [cm]	46,0	72,5	99,0	125,5	152,0	26,0	52,5	78,5	105,0	131,5
Pfahlalter Schlagzahl	F_w/F_o					F_w/F_o				
t = 0d	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
t = 56d n = 0	0,78	0,81	0,80	0,85	0,83	0,36	0,78	0,93	0,92	0,93
n = 200	0,76	0,80	0,79	0,83	0,81	0,36	0,77	0,93	0,91	0,92
n = 400	0,64	0,80	0,78	0,81	0,78	0,32	0,65	0,93	0,91	0,92
n = 600	0,54	0,80	0,77	0,80	0,76	0,29	0,57	0,93	0,91	0,92
n = 800	0,49	0,79	0,77	0,80	0,75	0,26	0,53	0,93	0,91	0,92

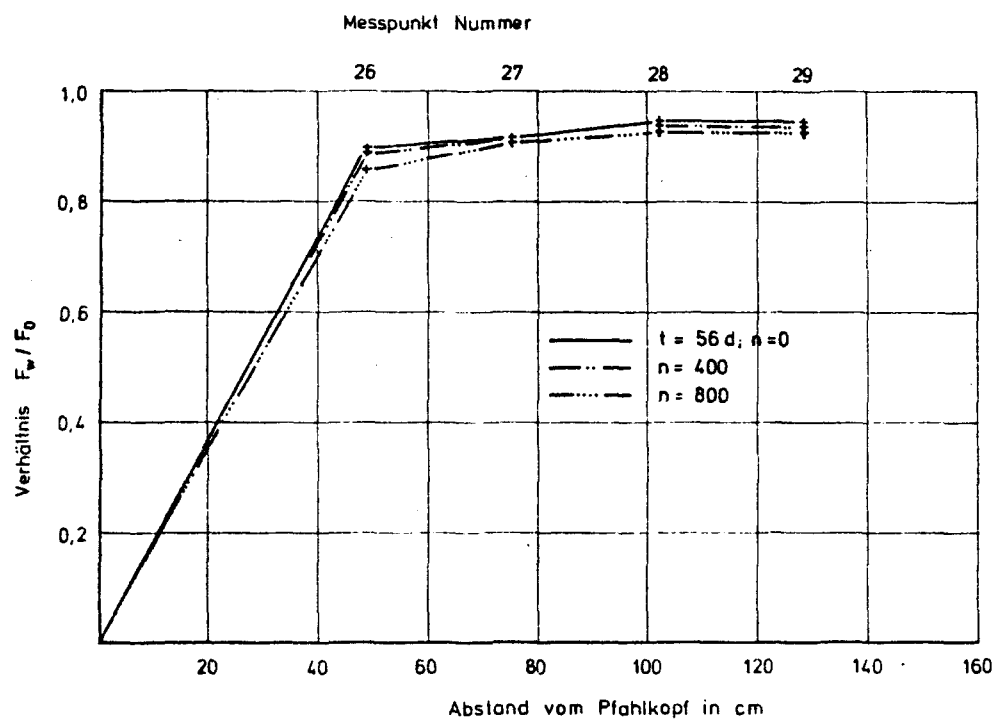


Bild 23 : Graphische Darstellung der Übertragungslänge, Pfahl 20

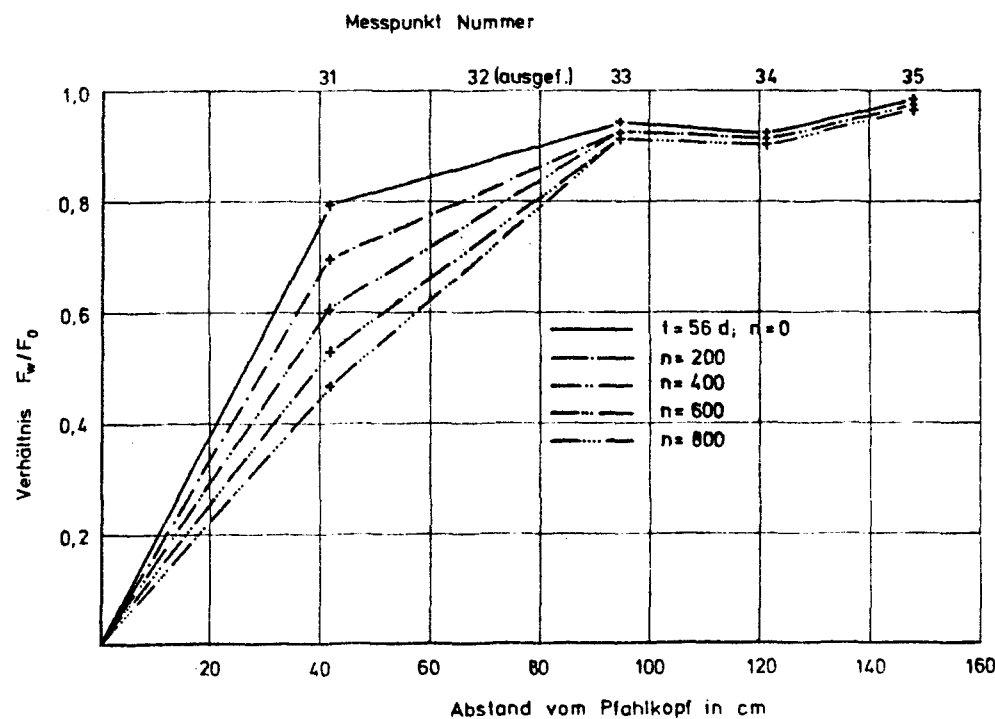


Bild 24 : Graphische Darstellung der Übertragungslänge, Pfahl 20

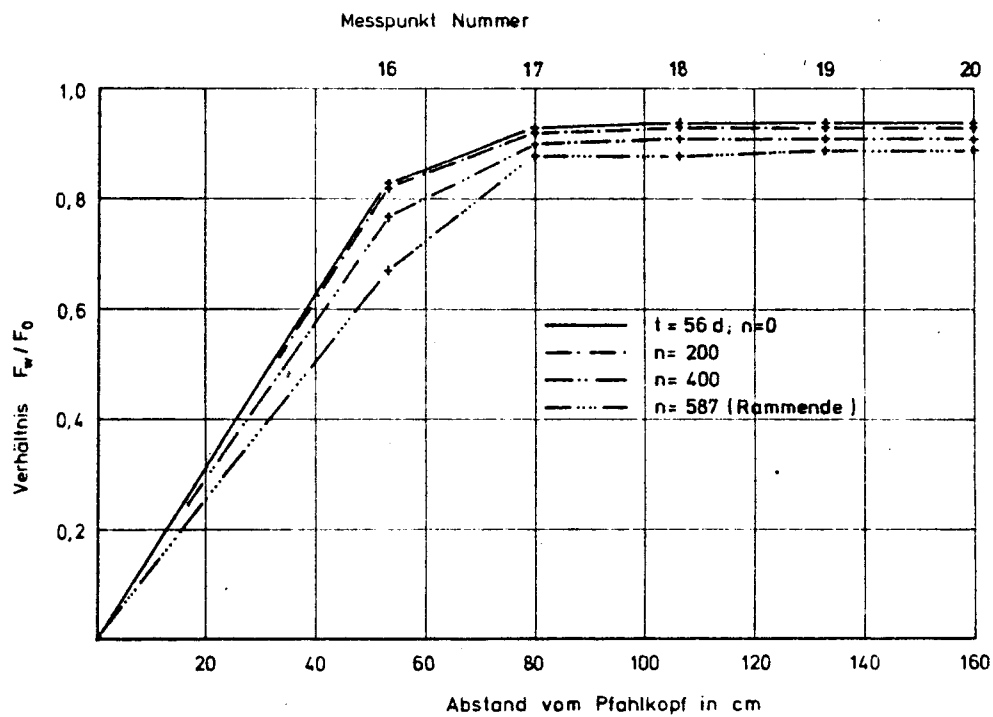


Bild 25 : Graphische Darstellung der Übertragungslänge, Pfahl 23

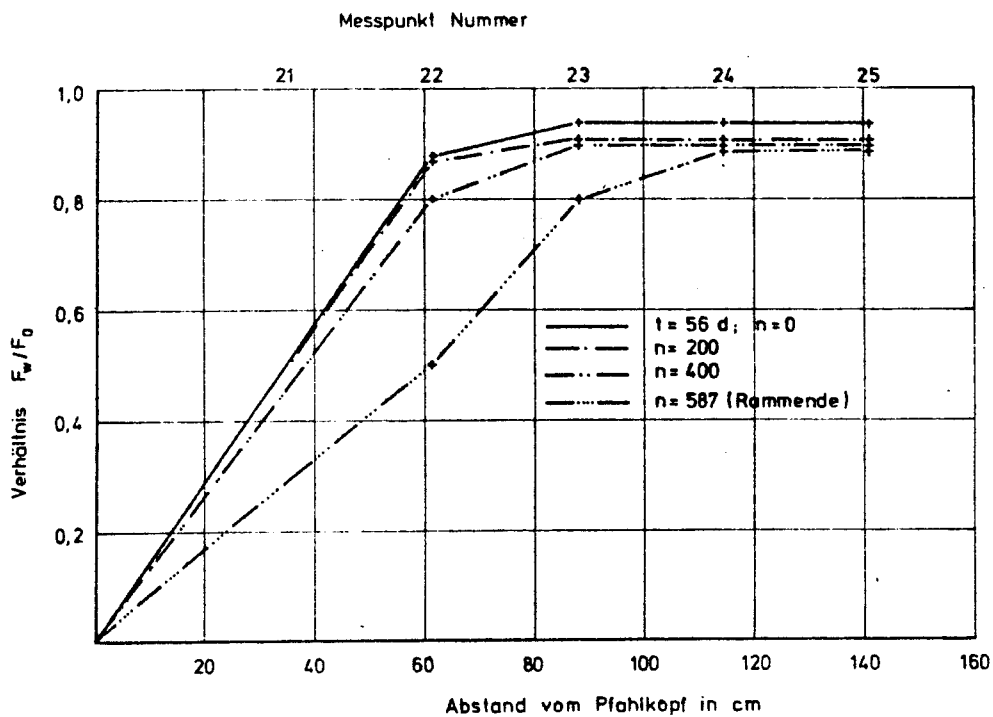


Bild 26 : Graphische Darstellung der Übertragungslänge, Pfahl 23

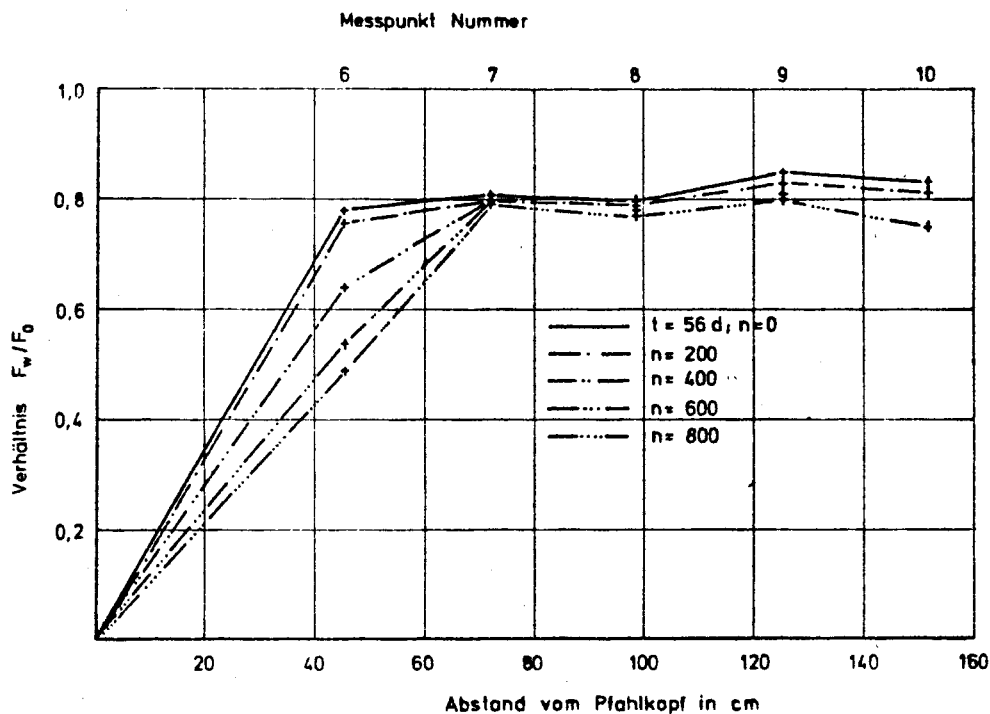


Bild 27 : Graphische Darstellung der Übertragungslänge, Pfahl 24

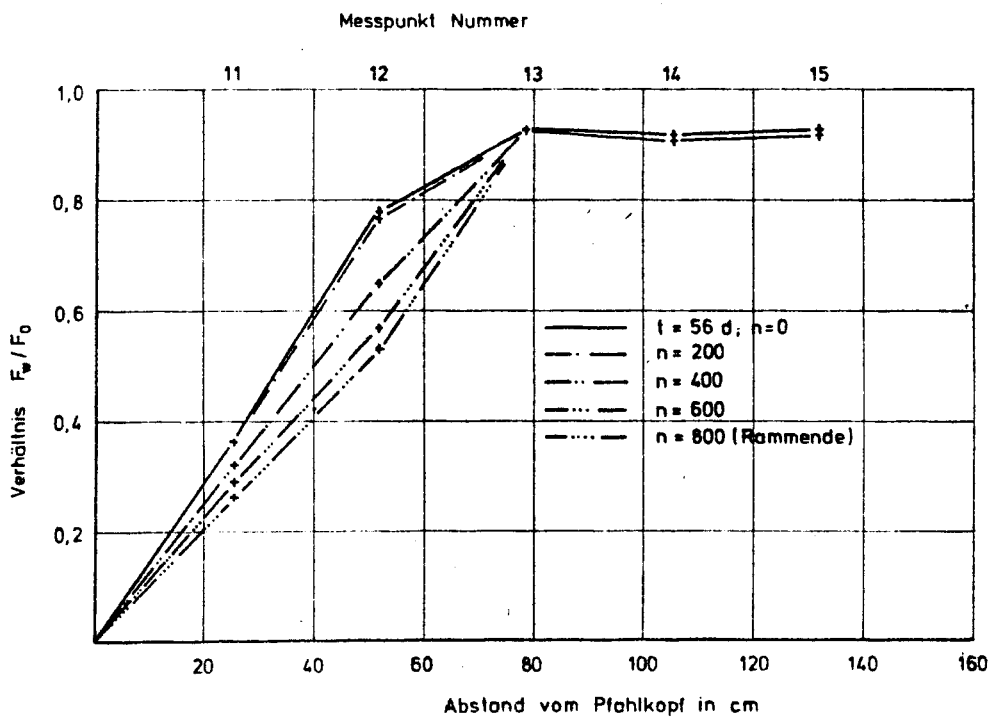


Bild 28 : Graphische Darstellung der Übertragungslänge, Pfahl 24

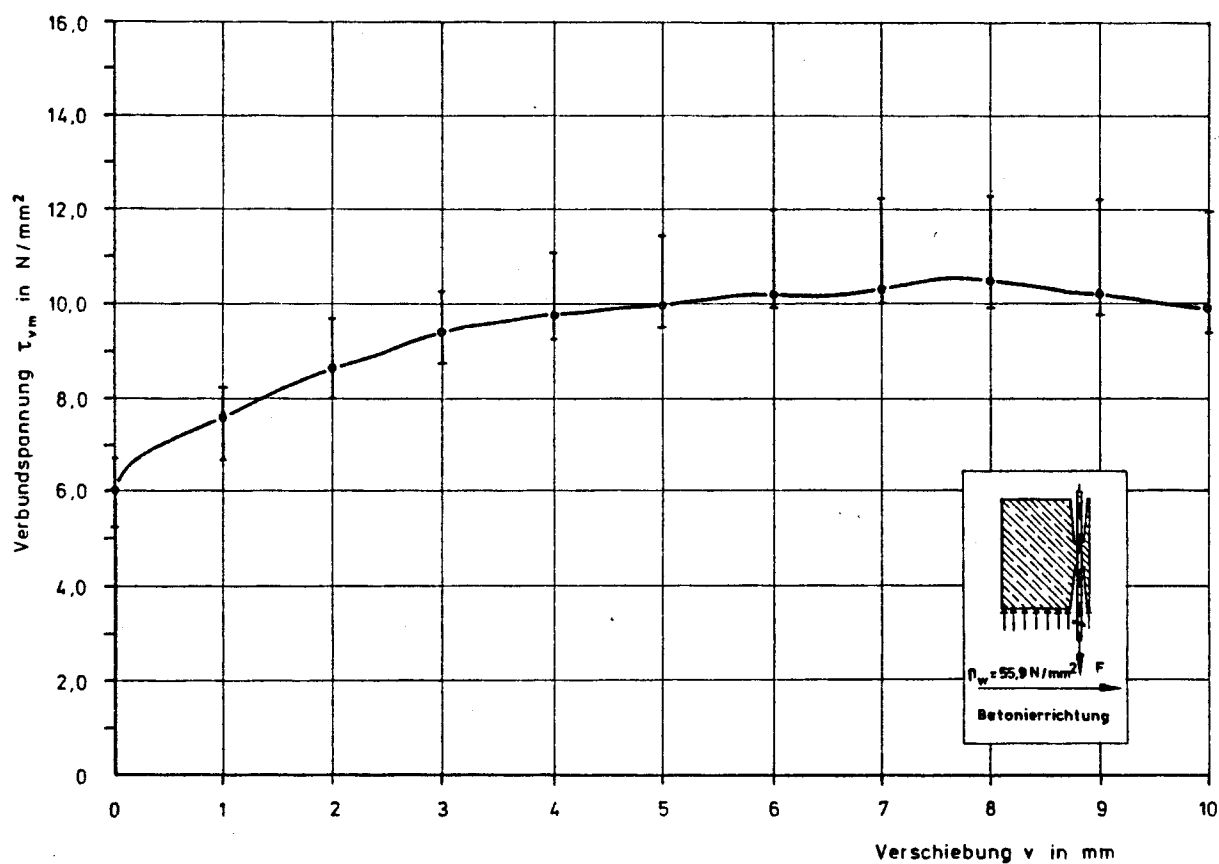


Bild 29 : Litzenausziehversuche, Verbundspannungs - Verschiebungsbeziehung τ_v - v , „untere Lage“

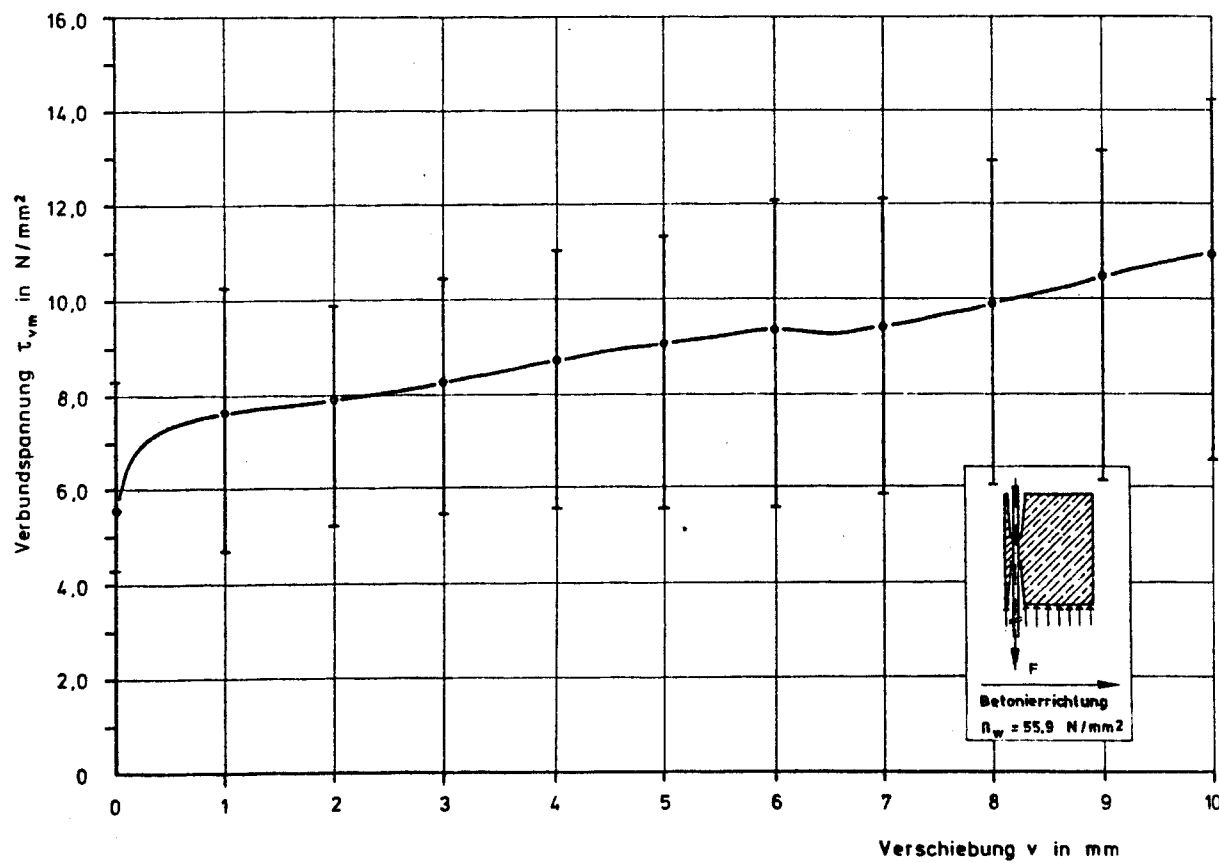


Bild 30 : Litzenausziehversuche, Verbundspannungs - Verschiebungsbeziehung τ_v - v , „obere Lage“

Tabelle 8 : Ergebnisse der Verbundhaftigkeitsuntersuchung an gerammten Pfahlköpfen

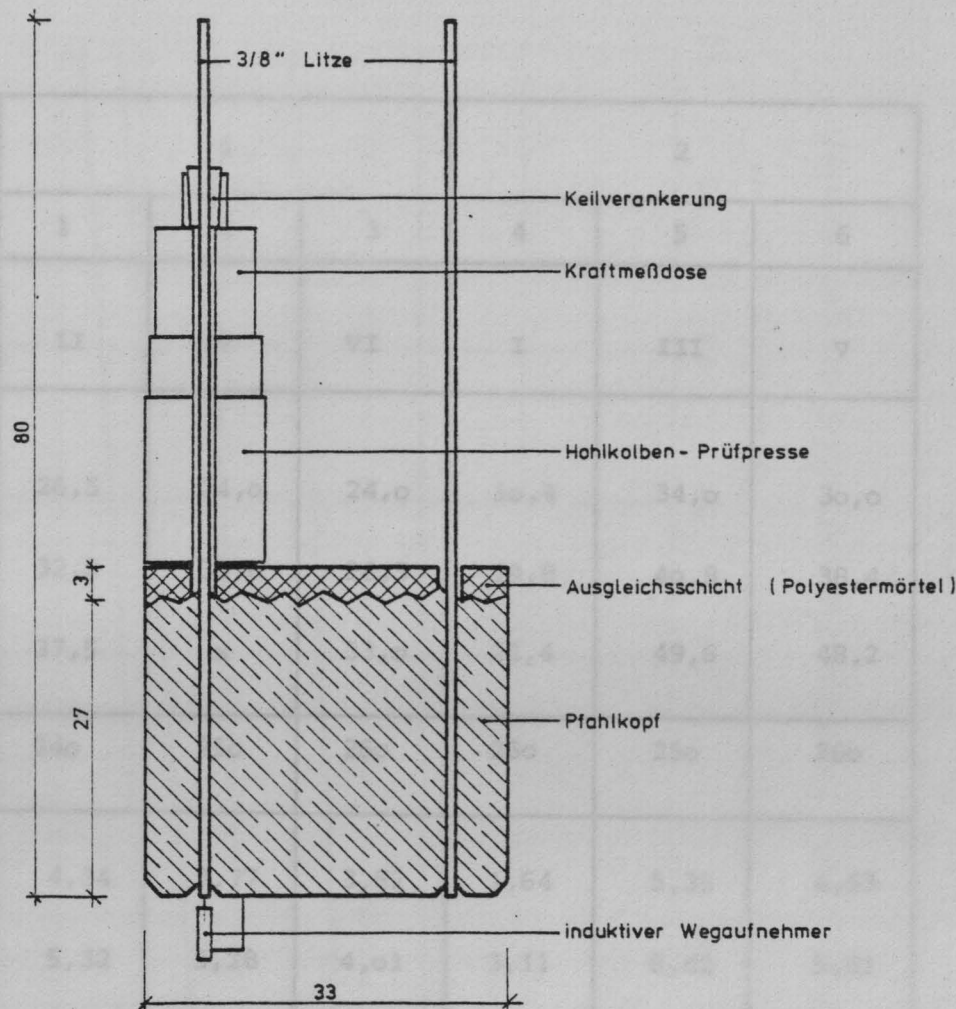


Bild 31 : Versuchseinrichtung für Litzenausziehversuche an gerammten Pfahlköpfen

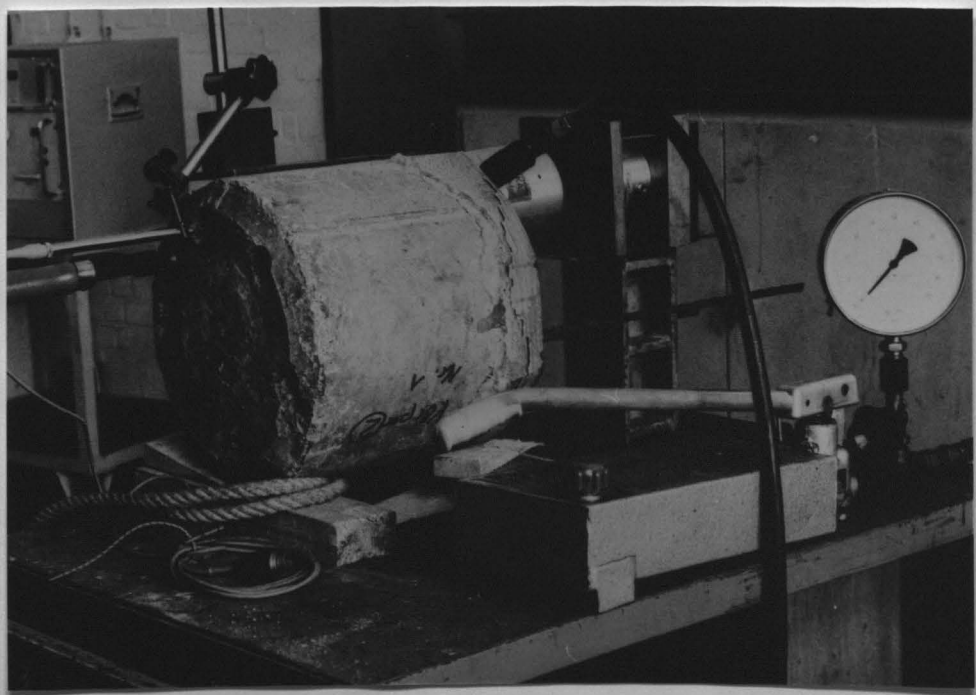
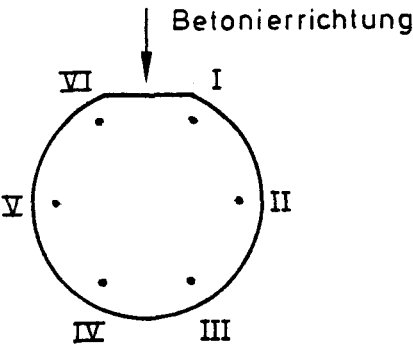


Tabelle 8 : Ergebnisse der Verbundfestigkeitsuntersuchung
an geramten Pfahlköpfen

Pfahlkopf Nr.	1			2		
Litzen Nr.	1	2	3	4	5	6
Lage der Litze beim Betonieren ¹⁾	II	IV	VI	I	III	V
2) $F_{o,01}$ kN	26,5	24,0	24,0	10,4	34,0	30,0
$F_{o,1}$ kN	32,5	33,6	26,5	19,8	40,8	38,4
$F_{1,0}$ kN	37,5	x	33,0	21,4	49,6	48,2
3) l_v mm	240	250	260	250	250	260
4) $\tau_{vo,01}$ N/mm ²	4,34	3,77	3,62	1,64	5,35	4,53
$\tau_{vo,1}$ N/mm ²	5,32	5,28	4,01	3,11	6,42	5,81
$\tau_{vo,1}$ N/mm ²	6,14	x	5,00	3,36	7,80	7,29

x Versuch abgebrochen

1) Litzenlage :



2) $F_{o,01}$ - Verbundkraft F bei einer Verschiebung $v = 0,01$ mm

3) Verbundlänge l_v

4) $\tau_{vo,01}$ - Verbundspannung bei einer Verschiebung $v = 0,01$ mm

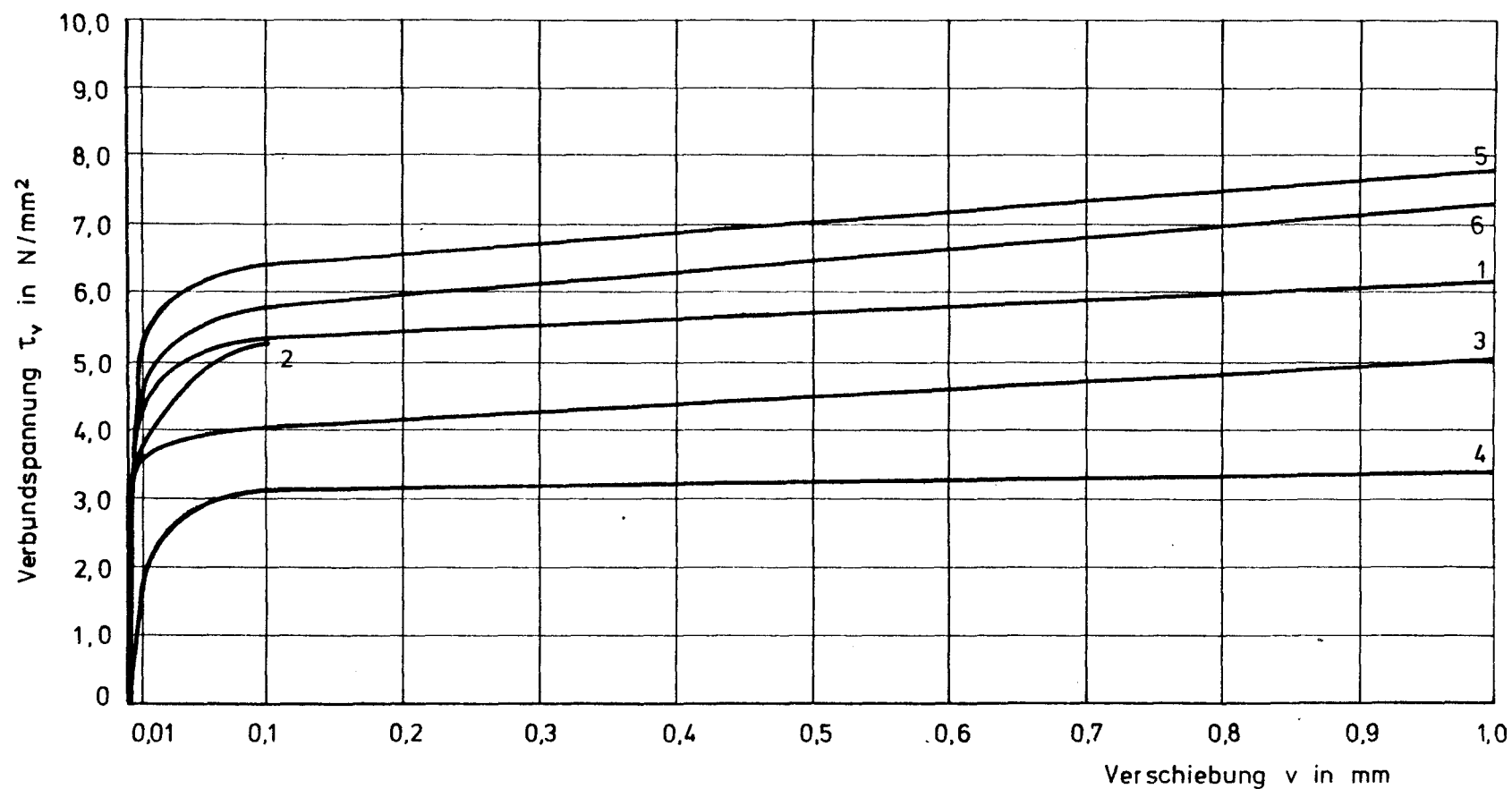
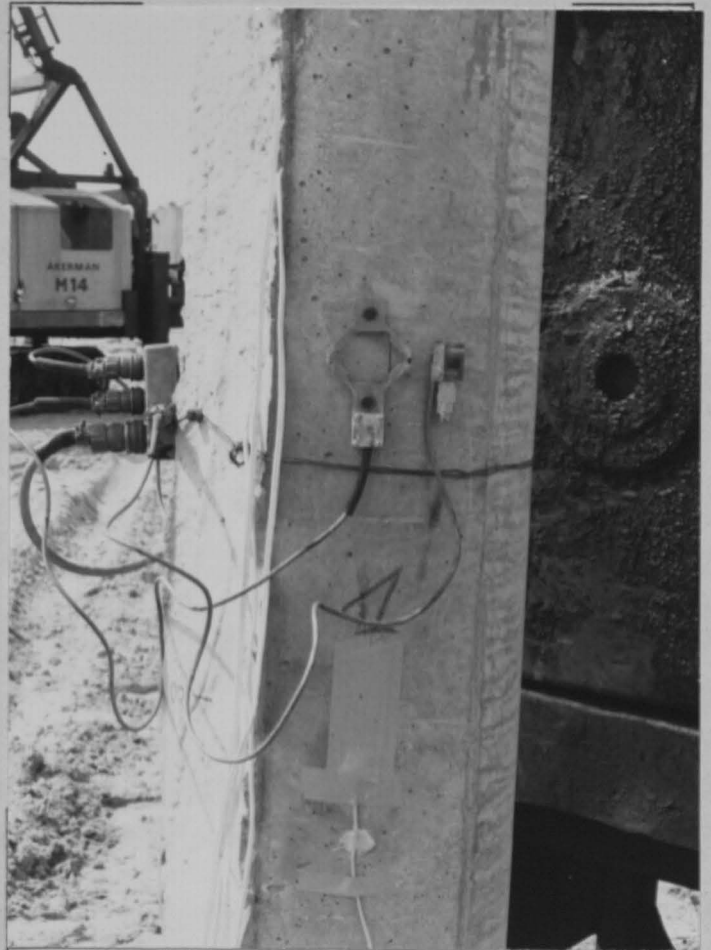
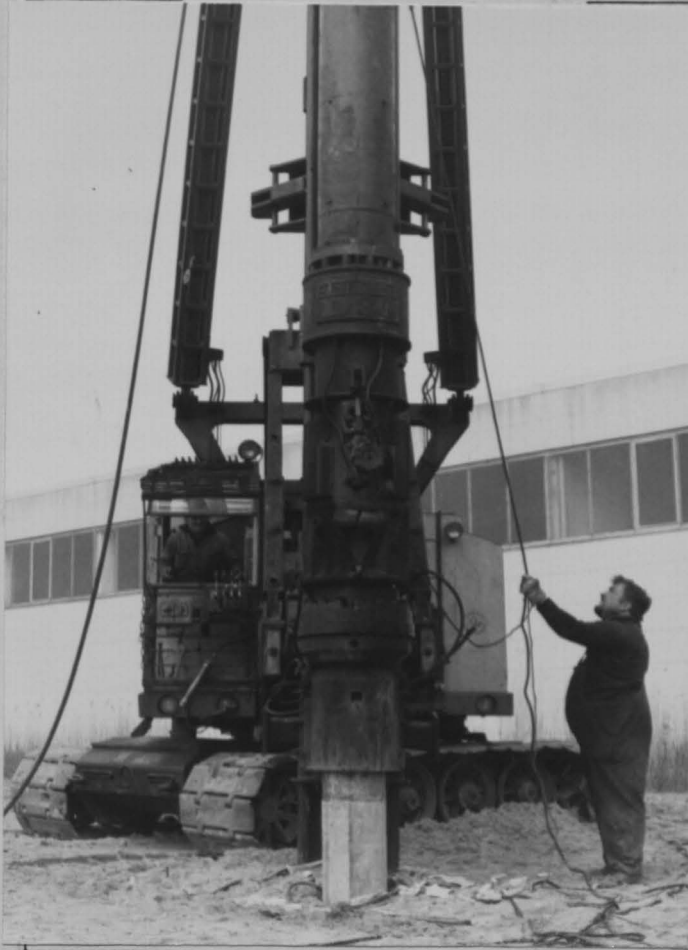


Bild 32: Darstellung der Meßergebnisse (τ_v über v) der Ausziehversuche an geramten Pfahlköpfen

Tabelle 9 : Ergebnisse der Untersuchung des dynamischen E-Moduls

Schlag Nr.	Druckkraft F kN	σ_b	ϵ_{b1} N/mm ²	ϵ_{b2} x 10 ⁶	ϵ_{b3}	ϵ_{bm}	E-Modul N/mm ²
1	5,09	0,288	9	8	4	7	38.630
	394,00	22,307	553	628	551	577	
	3,92	0,220	32	31	21	28	
2	5,09	0,288	30	30	22	27	38.495
	394,00	22,307	577	649	570	599	
	3,52	0,199	41	40	29	37	
10	5,09	0,288	34	35	23	31	38.899
	429,00	24,289	617	704	622	648	
	3,13	0,177	39	40	26	35	
20	5,09	0,288	38	39	26	34	38.619
	428,00	24,232	623	709	629	654	
	1,96	0,111	39	41	28	36	
21	6,27	0,355	70	70	65	68	38.747
	447,00	25,308	674	768	695	712	
	1,17	0,066	71	71	69	70	
30	5,09	0,288	75	74	66	72	38.666
	449,00	25,421	686	784	697	722	
	1,17	0,066	74	75	70	73	
31	3,92	0,222	72	72	64	69	38.561
	448,00	25,364	685	783	696	721	
	1,17	0,066	73	74	68	72	



Pfahlkopfbereich mit Meßwertaufnehmer für DPT-Messung
darunter : Betondehnmeßstreifen
(abgeklebt)

Rammgerät Delmag D 30 auf
Ackermann M 14 Fahrwerk

Pfahl Nr. 20
mit Anschlußkabeln für
Dehnmeßstellen

Bild 33 : Rammung der Versuchspfähle